le Scienze

Marzo 2020
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Venezia affonda

L’aumento delle acque alte eccezionali dovuto a subsidenza e global warming minaccia il futuro della città lagunare

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003
CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 619 - 3 MARZO 2020

Astrofisica
Il primo rivelatore sotterraneo di onde gravitazionali

Medicina
La rivoluzione dei farmaci a DNA

Etologia
Le sorprendenti capacità cognitive degli uccelli

«Il massimo contributo che un individuo
può dare per ridurre le emissioni di gas serra è essere morto.»

in copertina

L'azione congiunta della subsidenza e dell'aumento del livello medio del mare a causa del riscaldamento globale potrebbe aumentare la frequenza di eventi eccezionali di acqua alta (*Nicolò Miana/SIME*)

Sommario

Marzo 2020 numero 619

Illustrazione di Maria Corte

10

17

91

SCIENZA NEWS

Laura Lezza/Getty Images (*in alto*); coretsia NASA/ESA/HST Frontier Fields team (STScI) (*al centro*); idart/iStockphoto (*in basso*)

CARTA DEGLI IMPEGNI *Pink Lady®*

I MEMBRI DELL'ASSOCIAZIONE PINK LADY® EUROPA SI IMPEGNANO A:

Favorire la vicinanza, la trasparenza e gli scambi con i consumatori;

Incentivare le pratiche agroecologiche per ottenere frutti sani e di qualità;

Preservare le risorse naturali e raggiungere l'obiettivo carbon neutral entro il 2030;

Eliminare la plastica monouso e ridurre gli sprechi alimentari;

Mantenere i posti di lavoro e favorire il rinnovo delle generazioni;

Garantire ai produttori il giusto compenso e incoraggiare l'innovazione sostenibile.

SCOPRI I 14 IMPEGNI DELLA CARTA PINK LADY® EUROPA SU: **www.pinkladyeurope.com**

Molto più di una mela.

FIDEI ET VERITATIS ANCHORA
CONSIGLIO NAZIONALE DEL NOTARIATO

EMERGENCY
MEDICINA, DIRITTI E UGUAGLIANZA

di Marco Cattaneo

Editoriale

Riusciremo a salvare Venezia?

Subsidenza ed eustatismo minacciano la città, ma le soluzioni tardano ad arrivare

Venezia sprofonda. Non è una scoperta di oggi. E davanti alla catastrofica acqua granda del 12 novembre 2019 molti si sono affrettati a dire che l'acqua alta «c'è sempre stata», e che il cambiamento climatico non c'entra nulla. Ma i fatti raccontano un'altra storia.

Dal 1872 a oggi, vale a dire da quando sono stati registrati i valori dello zero mareografico a Punta della Salute, le alte maree eccezionali, quelle che superano i 140 centimetri, sono avvenute soltanto 24 volte, in 140 anni: 11 di queste, quasi la metà, nell'ultimo decennio. E se si guarda alle alte maree superiori ai 110 centimetri, fino al 1950 si contavano sulla punta delle dita. Tra il 2010 e il 2019 sono state 95, più che nell'intero secolo trascorso tra il 1870 e il 1969.

Come scrivono Marco Anzidei, Antonio Vecchio e Fabio Florindo a pagina 36, partendo da un loro lavoro pubblicato su «Water» nel luglio 2019, nella città lagunare sono al lavoro due forze che concorrono a minacciarne la sopravvivenza. La prima – e la più seria, almeno dalla metà del secolo scorso – è la subsidenza, ovvero il lento abbassamento del suolo, che può essere dovuto a cause naturali o antropiche. Antropiche, nel caso di Venezia, dove per decenni è stata estratta acqua dalla falda soprattutto nella zona industriale di Marghera. L'altra forza al lavoro è l'eustatismo, vale a dire l'innalzamento del livello dei mari. Che pur essendo meno pronunciato nel Mediterraneo, che è un bacino chiuso, potrebbe far salire il livello del mare fino a 53 centimetri da qui al 2100 (nello scenario peggiore tra quelli previsti dai modelli climatici).

Che Venezia sia in pericolo non è una scoperta di oggi, dicevamo. Tant'è che già dopo il primo allarmante aumento della frequenza delle acque alte, tra gli anni sessanta e settanta, con l'evento record del 1966 a 194 centimetri, fu istituito il Consorzio Venezia Nuova, per la salvaguardia della città e della laguna. Era il 1982. E sono già trascorsi quasi 25 anni da quando sentii parlare per la prima volta del MOSE; mi avevano mandato a Roma, alla sede della stampa estera, a seguire la conferenza stampa del *panel* di esperti del Massachusetts Institute of Technology che aveva valutato il progetto.

Come non ricordare poi il fatidico 14 maggio 2003, quando Silvio Berlusconi pose la prima pietra dell'imponente opera ingegneristica? «Via al MOSE, fermerà l'acqua alta nel 2010», titolava trionfalmente il «Corriere della Sera». Poi sono arrivati i costi lievitati, le inchieste per le tangenti, l'amministrazione straordinaria. Per non dire delle polemiche sul progetto ingegneristico, sulla cui funzionalità sono stati sollevati dubbi anche molto argomentati.

Polemiche che sembrano essere state sopite, almeno temporaneamente, dai primi test, portati a termine nella notte del 2 dicembre 2019 alla bocca di porto di Malamocco e il 14 gennaio alla bocca di Lido. Le paratoie si sono alzate tutte regolarmente, e dopo un'ulteriore sollevamento di prova al Lido, il 3 marzo, si passerà ai test alla bocca di Chioggia, i primi che verranno effettuati in condizioni di mare mosso.

L'odissea del MOSE, insomma, non è ancora terminata, e ci vorrà ancora un po' prima che le sospirate dighe mobili possano essere pienamente operative. Sarà a partire dal 30 giugno, hanno dichiarato i commissari dopo una riunione in prefettura il 22 gennaio. E speriamo che sia la volta buona.

A richiesta ad aprile, *L'ombra di Einstein*, un libro di Seth Fletcher sull'impresa scientifica che ha portato alla prima immagine di un buco nero

Come è nata la foto del secolo

Dallo scorso anno nella galleria delle icone della scienza c'è anche un'immagine che ha fatto il giro del mondo subito dopo la sua pubblicazione, avvenuta il 10 aprile 2019. È la foto di un buco nero, o meglio dell'orizzonte degli eventi di un buco nero, una regione di spazio che circonda questo oggetto astronomico e che segna un confine unico nell'universo. Una volta superato, nulla può resistere all'attrazione gravitazionale di un buco nero, nemmeno la luce: tornare indietro è impossibile.

In effetti, nella foto si può notare un alone che vira dal bianco al giallo al rosso e che delimita un misterioso e inquietante cerchio, scuro come lo spazio sullo sfondo di tutta la scena. Quell'alone è la luce, ovvero la radiazione elettromagnetica, emessa dalla materia che danza sull'orlo dell'abisso.

Tutto è abbastanza semplice e diretto, ma non bisogna farsi ingannare dalle apparenze. Per ottenere quell'immagine ci sono voluti quasi 15 anni di lavoro che ha coinvolto centinaia di ricercatori, ed è stato necessario collegare tra loro dieci diversi telescopi sparsi nel mondo, in modo da formare un unico gigantesco telescopio virtuale, l'Event Horizon Telescope (EHT), che ha osservato il centro della galassia M87, distante 55 milioni di anni luce dalla Terra. È stato un po' come cercare di leggere un quotidiano a New York, trovandosi a Parigi. La prima foto di un buco nero, quindi, è l'ennesima storia di successo della scienza che coinvolge numerosi gruppi di ricerca su tempi relativamente lunghi.

Ed è la storia raccontata da Seth Fletcher, *chief features editor* di «Scientific American» in *L'ombra di Einstein*, libro allegato a richiesta con «Le Scienze» di aprile. L'autore ha seguito questa impresa epocale fin dal 2011, presenziando a conferenze, incontri e lavori del progetto EHT e condividendo non solo il successo finale, ma anche le delusioni che hanno segnato il cammino. La foto, che molti hanno subito ribattezzato «la foto del secolo», ha anche sancito in modo definitivo l'esistenza dei buchi neri, oggetti emersi da soluzioni per le equazioni della relatività generale di Albert Einstein, così mostruosamente singolari da essere considerati per lungo tempo solo una bizzarria matematica. Un'immagine, quindi, che vale più di mille parole.

QUADERNI

Ascesa e caduta dei dinosauri

Le recenti scoperte e i nuovi studi che stanno riscrivendo la storia degli antichi dominatori della Terra sono al centro del nuovo titolo della collana *I quaderni de Le Scienze*. Come gli altri già pubblicati, anche *Dinosauri* è esclusivamente digitale – in formato PDF interattivo, scaricabile e stampabile – e raccoglie alcuni dei migliori articoli, italiani e internazionali, pubblicati nell'edizione cartacea e in quella on line della rivista su un tema di attualità scientifica. I singoli quaderni possono essere acquistati a 3,99 euro sul nostro sito web: https://www.lescienze.it/plus/edicola/collane/quaderni.jsp. Gli argomenti già pubblicati riguardano esopianeti, impatto del riscaldamento globale su Artide e Antartide, materia oscura, coscienza, Neanderthal e intelligenza artificiale.

iStock; elaborazione Le Scienze

Luigi Ambrosio ha ricevuto un importante premio per il suo lavoro su un problema formulato secoli fa e che può essere applicato all'intelligenza artificiale

La lunga vita di un problema matematico

Una volta formulati, i problemi matematici possono seguire percorsi molto diversi tra loro: alcuni vengono risolti nel giro di poco tempo, altri possono invece restare «silenti» per moltissimi anni, prima che un'intuizione brillante o lo sviluppo di nuove tecniche li faccia tornare improvvisamente di moda. A quest'ultima categoria appartiene il «problema del trasporto ottimale», formulato nel 1781, che ha vissuto un autentico revival a partire dagli anni quaranta, con applicazioni imprevedibili. Uno degli artefici degli sviluppi più recenti è il matematico Luigi Ambrosio, attuale direttore della Scuola normale superiore di Pisa, che per le sue ricerche in questo campo ha ricevuto nel 2019 il premio Balzan, assegnato ogni anno dall'omonima Fondazione a quattro studiosi che si siano distinti in campo umanistico o scientifico.

Nella motivazione del premio si legge che il suo lavoro ha permesso di «gettare ponti inattesi tra le equazioni alle derivate parziali e il calcolo delle variazioni». Può spiegarci meglio?

Il problema del trasporto ottimale, la cui formulazione originaria è dovuta al matematico francese Gaspard Monge, riguarda lo spostamento di una massa da un punto a un altro. In particolare Monge fece l'esempio di una pila di materiale e di una buca, ponendosi la domanda: qual è il percorso che mi permette di riempire la buca nel modo più efficiente possibile e con il minor costo in termini di lavoro? Si tratta di una variante dei problemi classici del cosiddetto calcolo delle variazioni, che in generale riguardano le curve e le superfici che minimizzano una certa quantità.

Il mio contributo, insieme a quello di altri studiosi, è stato «importare» nello studio del trasporto ottimale tecniche proprie delle equazioni alle derivate parziali, che invece studiano come un sistema evolve nel tempo e nello spazio, e della teoria geometrica della misura. Questo ha permesso, tra le altre cose, di allargare il campo delle possibili applicazioni di questo problema.

Oggi queste applicazioni riguardano molti settori. Quali sono gli esempi più interessanti?

Il trasporto ottimale è un problema che si applica a esigenze estremamente pratiche, legate all'allocazione efficace di risorse. Per esempio nel settore del commercio un tipico problema di trasporto ottimale è stabilire qual è il miglior piano di trasporto di una certa quantità di beni dal produttore al consumatore (per esempio da una pasticceria ai vari *bistrot*). Ma i campi di applicazione sono davvero tanti, dalla dinamica dei fluidi alla finanza, fino ad arrivare persino all'intelligenza artificiale.

Le regole della Fondazione Balzan prevedono che la metà di ciascun premio, pari in totale a circa 670.000 euro, sia destinata al finanziamento di un progetto di ricerca in cui siano coinvolti giovani ricercatori. Ha già un'idea di come investire la metà del suo premio?

Sì, ho pensato che il modo migliore per farlo sia destinare la quasi totalità di questa somma ad assegni di ricerca, sempre all'interno della Scuola normale superiore di Pisa, strutturati in un piano quinquennale. In particolare l'idea è bandire cinque assegni biennali il cui importo sarà superiore agli standard medi italiani, in modo anche da attrarre più facilmente candidati particolarmente autorevoli.

Quali saranno i temi di ricerca di questi assegni?

Laura Lezza/Getty Images (*al centro*); coretsia Luigi Ambrosio (*Ambrosio*)

di Matteo Serra

CHI È
LUIGI AMBROSIO

Matematico, si è laureato all'Università di Pisa nel 1985 sotto la guida di Ennio De Giorgi, lavorando poi come ricercatore, professore associato e ordinario alle università di Roma Tor Vergata, Pisa, Salerno e Pavia. Dal 1998 è professore ordinario di analisi matematica alla Scuola normale superiore di Pisa, di cui è diventato direttore nel 2019. Dal 2005 è socio dell'Accademia nazionale dei Lincei.
I suoi principali interessi di ricerca riguardano il calcolo delle variazioni, la teoria geometrica della misura e la teoria del trasporto ottimale. Tra i suoi allievi alla Scuola normale figura anche Alessio Figalli, vincitore nel 2018 della medaglia Fields, il massimo riconoscimento per un matematico.

Ambrosio, in cravatta rossa, partecipa a una conferenza di Figalli, suo ex allievo premiato nel 2018 con la medaglia Fields.

Gli assegni saranno nell'ambito di tre filoni principali: i primi due, più strettamente legati ai miei interessi di ricerca, riguardano le equazioni alle derivate parziali studiate con le tecniche del trasporto ottimale e la geometria degli spazi detti «non lisci», cioè dotati di spigoli e discontinuità. Il terzo filone riguarda invece uno dei campi di applicazione più recenti e promettenti del problema del trasporto ottimale: il *machine learning*, ovvero l'apprendimento automatico delle macchine. In quest'ultimo ambito, di cui personalmente non sono un esperto, saranno coinvolti anche alcuni miei collaboratori.

In che modo il problema del trasporto ottimale può essere applicato al machine learning?

Uno dei problemi legati all'apprendimento automatico è riuscire a misurare l'errore associato all'addestramento di una certa rete, con l'obiettivo di minimizzarlo. L'errore si può modellizzare come una distanza tra due punti: ma se pensiamo al problema della pila e della buca di Monge, in quel caso il minimo costo di trasporto esprime proprio una distanza. Quindi è abbastanza naturale usare lo stesso approccio per capire come rendere minimo l'errore computazionale.

Ma non c'è solo questo: il machine learning è una disciplina che sta letteralmente esplodendo e offre moltissimi problemi su cui è possibile lavorare.

Lei è da poco direttore della Scuola normale superiore di Pisa, ruolo che le offre un osservatorio privilegiato sulle politiche della ricerca. Qual è lo stato della ricerca in matematica in Italia oggi?

La scuola matematica italiana continua a essere di ottimo livello, come dimostra l'alta competitività dei nostri laureati a livello internazionale. Tuttavia, nonostante esistano meccanismi che in alcuni casi agevolano il rientro di alcuni ricercatori brillanti, se il livello di finanziamenti alla ricerca continuerà a essere così basso questa situazione non potrà durare a lungo: prima o poi interverrà il ricambio generazionale, e se tutte le persone di punta di una certa generazione vanno a lavorare all'estero, sarà impossibile mantenere un alto livello di qualità. È un discorso che vale per la ricerca in matematica ma in generale anche per l'intera accademia italiana.

Per quanto riguarda invece la percezione della matematica nella società, vede un miglioramento rispetto al passato?

Direi proprio di sì. Grazie alle tante applicazioni che ha oggi la matematica, all'interno di discipline molto attuali come per esempio la stessa intelligenza artificiale e lo studio dei *big data*, ho la sensazione che venga finalmente percepita come una disciplina più vicina al mondo reale, rispetto a certi stereotipi che circolavano in passato. Tutto questo è anche certificato da un deciso aumento del numero di iscritti ai corsi di laurea in matematica negli ultimi anni. Credo poi che la recente vittoria della medaglia Fields da parte di Alessio Figalli, che è stato mio allievo, abbia costituito un importante «traino» da questo punto di vista.

Un test funzionale valuta l'interazione tra cellule di pazienti oncologici e farmaci o cellule immunitarie per prevedere l'efficacia delle terapie

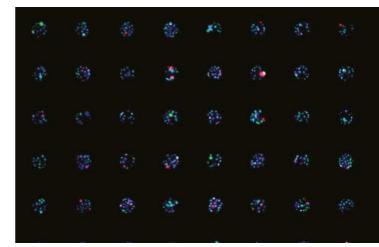
Medicina di precisione contro i tumori

Applicare l'ingegneria alle cellule, non per costruirne di nuove ma per studiare con precisione il loro comportamento. Come? Grazie a una macchina complessa capace di lavorare nel mondo dell'invisibile a occhio nudo e così capire se una terapia sarà effettivamente efficace contro una specifica malattia. Ecco in poche parole l'obiettivo di CellPly, azienda di Bologna fondata da due ingegneri – Massimo Bocchi e Roberto Guerrieri – con il pallino del *business* e delle biotecnologie. «L'ispirazione mi è venuta in California, dopo i miei anni di studio all'Università di Bologna», ricorda Bocchi, che è amministratore delegato della società.

«Insieme a Roberto Guerrieri, che è professore di ingegneria elettronica all'Università di Bologna, abbiamo coordinato un progetto europeo che studiava soluzioni al confine fra microtecnologie e scienze della vita. Tra i partner c'erano diversi istituti in Europa, come il Fraunhofer in Germania e il CEA in Francia, con cui è stata sviluppata la tecnologia iniziale. Da una parte ho avuto l'occasione di apprezzare le potenzialità di combinare l'ingegneria con le biotecnologie per risolvere problemi in un campo di frontiera. Dall'altra ho avuto l'opportunità di vedere negli stessi anni un altro esempio imprenditoriale svilupparsi dal nostro laboratorio: Silicon Biosystems, azienda fondata da Roberto Guerrieri, e poi acquisita da Menarini».

A ciascuno il suo

Ma la svolta in senso imprenditoriale arriva quando il giovane ingegnere va nella Silicon Valley grazie a una borsa di studio del programma Fulbright BEST, nel 2009. «Lì ho lavorato in un'azienda *biotech* che già dieci anni fa scommetteva sulla medicina personalizzata e ho fatto una *full immersion* in un ambiente che non ha eguali: quando sei lì ti sembra di poter cambiare il mondo. È stata quell'esperienza a cambiarmi la vita», prosegue Bocchi. Il ritorno in Italia è stato però come una doccia gelata: scarsa propensione all'imprenditorialità, lentezza della burocrazia, difficoltà a trovare gli investitori. «Ma non mi sono scoraggiato e abbiamo lavorato ancora per tre anni per migliorare la tecnologia», dice l'ingegnere. «Nel 2013 abbiamo trovato il primo finanziamento.»

L'idea con cui Bocchi ha convinto gli investitori è in linea con lo sviluppo più all'avanguardia dell'oncologia: la medicina di precisione, la possibilità cioè di curare ogni singolo paziente in maniera specifica, di cucirgli addosso un vestito come farebbe un sarto. Una prospettiva diventata realtà grazie allo sviluppo di tecnologie potenti di sequenziamento e della genomica, e di elaborazione di quantità ingenti di dati con i sistemi di intelligenza artificiale, che spesso però mostrano una capacità predittiva limitata. L'idea di CellPly si colloca in questo filone della pratica clinica, ma da una prospettiva peculiare: anziché vedere come è fatta la cellula tumorale, cioè qual è il suo patrimonio genetico e quindi le mutazioni che l'hanno resa malata, CellPly punta l'attenzione su come si comportano le cellule tumorali e quelle immunitarie.

Cortesia CellPly (*tutte le foto in questa pagina e a fronte*)

«Si chiama test funzionale e serve ad analizzare come le cellule vive prelevate da un paziente interagiscono *in vitro* con i farmaci o con cellule immunitarie. Informazioni preziose che servono a prevedere l'efficacia di una o più terapie su quel singolo paziente», spiega Bocchi. «Grazie ai nostri sistemi miniaturizzati, da un cam-

di Letizia Gabaglio

Immagine al microscopio di una schiera di microtumori nel dispositivo CellPly. Sotto: microdispositivo in cui sono ricreati 20.000 microtumori, esposti a 16 differenti terapie.

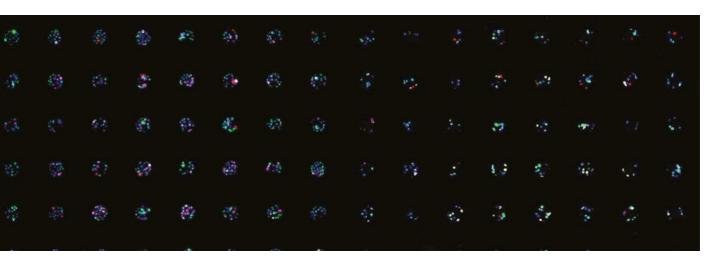
LA SCHEDA - CELLPLY

Azienda fondata nel 2014

Persone di riferimento: Massimo Bocchi, co-fondatore e CEO; Roberto Guerrieri, co-fondatore

Sito: http://www.cellply.com **Mail:** info@cellply.com

Numero di brevetti: 7

Dipendenti-collaboratori: 12

pione di sangue riusciamo a sviluppare 20.000 microtumori che poi a gruppetti di migliaia esponiamo a diverse terapie per capire come reagiscono. Quindi grazie a tecniche di *machine learning* cerchiamo le correlazioni fra il comportamento delle cellule e la risposta alla terapia: entro due giorni la piattaforma prevede che cosa accadrà al paziente nell'arco di mesi».

CellPly ha identificato un forte bisogno di questa tipologia di test soprattutto nell'ambito delle nuove terapie immuno-oncologiche, che sfruttano il sistema immunitario cercando di sbloccarlo o potenziarlo, ma che sono molto costose e funzionano solo in una frazione dei pazienti. Avere a disposizione una piattaforma che in due giorni dice al medico se la terapia funzionerà o meno, quindi, sarebbe un grande aiuto non solo dal punto di vista del paziente ma anche del sistema sanitario.

Gli sviluppi più recenti

Per validare la tecnologia, Bocchi e il suo gruppo hanno effettuato uno studio su pazienti affetti da leucemie acute che ha dimostrato un'elevata capacità predittiva. Lo scorso dicembre, nell'ambito del mieloma multiplo, CellPly, in collaborazione con il Policlinico Sant'Orsola-Malpighi di Bologna, ha presentato risultati al più importante congresso di ematologia, quello dell'American Society of Hematology. Grazie ai test sui tumori del sangue, CellPly ha dimostrato diversi vantaggi della propria soluzione rispetto a tecnologie concorrenti quando usata con cellule in sospensione. Un vantaggio che può essere sfruttato anche nel caso delle nuovissime terapie cellulari – come CAR-T e CAR-NK – che prevedono l'ingegnerizzazione di cellule del sistema immunitario poi re-infuse per combattere il tumore.

«Da pochi mesi abbiamo sviluppato un nuovo metodo per misurare la funzione di singole cellule del sistema immunitario. Questo risultato apre l'opportunità di applicare la tecnologia all'immuno-oncologia, una delle aree più promettenti per lo sviluppo di farmaci: negli ultimi anni il numero di immunoterapie in sperimentazione è quasi raddoppiato», dice Bocchi. Parallelamente, CellPly ha vinto un finanziamento europeo di oltre due milioni di euro per completare l'industrializzazione della tecnologia: nel consorzio al lavoro ci sono anche l'Università di Bologna e l'Ospedale universitario della Charité di Berlino, dove al momento è installata una versione beta del macchinario ed è in corso uno studio sulle leucemie acute. «La nostra idea è vendere la macchina, non il servizio, così ogni laboratorio di aziende farmaceutiche e ospedali potrà eseguire il test in maniera veloce, semplice e standardizzata. La collaborazione con Berlino sta dimostrando che anche un laboratorio che non aveva mai eseguito analisi di questo genere può farle con la nostra piattaforma dopo un affiancamento per rendere i tecnici autonomi», conclude l'ingegnere.

Ma a comprare la tecnologia potranno essere anche aziende farmaceutiche che vogliono testare farmaci e terapie cellulari in fase di sviluppo così da vendere la terapia insieme al test che ne valuta l'efficacia, come già succede per alcuni farmaci che colpiscono mutazioni genetiche, o per ottimizzare i processi di produzione delle terapie cellulari. La medicina di precisione è una realtà e lo sarà sempre di più, grazie anche agli ingegneri di Bologna.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

Auto targate in modo geometrico

Alcuni produttori di automobili hanno attinto a piene mani dalla geometria per disegnare i propri logo

La casa automobilistica cinese Geely ha creato nel 2019 una nuova marca di auto elettriche chiamata Geometry. Altre case automobilistiche usano invece la geometria per il proprio logo.

Mercedes-Benz, per esempio, pone una stella a tre punte in un cerchio, a rappresentare la fusione avvenuta nel 1926 tra due ditte: Benz, il cui logo originario era una corona d'alloro che simboleggiava la vittoria, e Mercedes, agli inizi chiamata Daimler, che usava una stella a tre punte per indicare un mercato tripartito di veicoli terrestri, acquatici e aerei.

Una stella a cinque punte inserita in un pentagono regolare costituiva invece dal 1962 la famosa Pentastar di Chrysler, fino alla fusione con la FIAT avvenuta nel 2014. Sembra che in origine la stella indicasse le cinque divisioni automobilistiche della fabbrica, ma il simbolo in sé è essenzialmente pitagorico: furono infatti Pitagora o i suoi discepoli a scoprire le straordinarie proprietà di simmetria del pentagono e delle sue diagonali, che stanno in proporzione aurea con i lati.

Le stelle di Mercedes e Chrysler sono rappresentazioni dei gruppi diedrici D3 e D5, che descrivono rispettivamente le possibili simmetrie del triangolo e del pentagono regolari. Il gruppo D3 consiste di sei elementi: tre rotazioni di 120, 240 e 360 gradi, e tre riflessioni rispetto alle tre altezze del triangolo. Analogamente, il gruppo D5 consiste di dieci elementi: cinque rotazioni e cinque riflessioni.

Triangoli singolari

Invece di inserire un triangolo in un cerchio, dal 1929 Lancia fa il contrario: inserisce un cerchio, che rappresenta un volante, in un triangolo a lati curvi, che ricorda uno scudo. Quest'ultimo è in realtà un triangolo di Reuleaux, in cui ogni lato è l'arco di cerchio che unisce due vertici, e ha il centro nel vertice opposto. Si tratta di una figura ad ampiezza costante, anche se a prima vista si potrebbe immaginare che solo il cerchio abbia questa proprietà.

Anche il triangolo del logo di Mitsubishi è singolare, e costituisce una geniale combinazione degli stemmi di due famiglie: il trifoglio di quercia della famiglia Tosa, e i tre rombi sovrapposti della famiglia Iwasaki. Quest'ultima comprò nel 1870 l'impresa di spedizioni della prima, e la rifondò come Mitsubishi, il cui nome significa letteralmente «tre foglie di castagna d'acqua», che sono appunto romboidali, e figurativamente «tre rombi».

Il logo risale al 1914, e si costruisce prendendo un triangolo equilatero, dividendolo in nove triangolini equilateri, e sottraendo i tre disposti al centro dei lati. Il risultato è un trifoglio romboidale, che ha un'area pari a due terzi del triangolo originario, e costituisce il primo passo della costruzione del frattale Mitsubishi, la cui dimensione di Haussdorf è circa 1,63: pari, cioè, al rapporto fra il logaritmo di 6 (numero dei triangolini rimasti) e il logaritmo di 3 (inverso del fattore di riduzione lineare del triangolo).

Stil novo

Due logo matematici recenti, rispettivamente del 1972 e del 1989, sono quelli di Renault e Toyota. Il primo è un logo d'autore, essendo opera di Victor Vasarely e di suo figlio Yvaral: chi conosca i lavori dell'artista non può stupirsi che egli abbia pensato di trasformare il bordo del rombo originario in una striscia di Möbius, che è una paradossale superficie non orientabile, con un unico bordo e un'unica faccia.

Il secondo logo è invece una composizione di tre ellissi, due delle quali stilizzano l'iniziale T del nome Toyota e rappresentano il rapporto fra produttore e compratore, mentre la terza indica il mercato che li ingloba, i cui spazi vuoti costituiscono il potenziale di crescita dell'azienda, a conferma del potere metaforico della matematica e dei suoi oggetti.

di Elena Castellani

professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Clima e modelli scientifici

Le questioni che motivano lo sviluppo di una filosofia della scienza del clima

Lo studio del clima e, in particolare del cambiamento climatico, sta suscitando sempre più interesse nella comunità filosofica, oltre che nel largo pubblico. Questo non è sorprendente, data la rilevanza delle ricadute ambientali che sono in gioco, con i relativi effetti sulla qualità della vita di tutti. L'urgenza della questione ambientale costituisce un'evidente motivazione per analisi filosofiche delle implicazioni etiche, sociali e politico-economiche del cambiamento climatico: responsabilità rispetto alla natura e alle generazioni presenti e future, valori e razionalità delle scelte da fare, modalità della comunicazione nell'epoca dei *social media*, costruzione del consenso e gestione del dissenso, sono esempi delle tematiche coinvolte, su cui i filosofi hanno molto da dire, anche per consentirne un corretto inquadramento.

Ci sono poi aspetti di natura epistemologica e metodologica degli studi sul clima che chiamano in causa specificatamente la filosofia della scienza, tanto che si comincia a parlare di una «filosofia della scienza del clima» come disciplina a sé, accanto alle altre filosofie delle scienze particolari. E anche in questo caso, come succede spesso quando l'analisi filosofica si occupa di ricerche scientifiche di frontiera, si assiste a una proficua interazione tra filosofi della scienza e scienziati. Un testo di riferimento in questo senso è il volume *Climate Modelling. Philosophical and Conceptual Issues* (2018), curato dai filosofi statunitensi Elizabeth A. Loyd e Eric Winsberg, che raccoglie appunto contributi di entrambe le categorie.

Il ruolo dei modelli

In questo tipo di analisi la nozione chiave è proprio quella di modello. Le ricerche scientifiche sul clima sono infatti condotte principalmente attraverso la costruzione e l'uso di modelli fisico-matematici e, in particolare, di simulazioni al computer, fondamentali per riuscire a trattare in modo efficace fenomeni così complessi e difficilmente riproducibili in laboratorio. Queste attività di modellizzazione e simulazione seguono metodologie collaudate, improntate a criteri testati e valutati sulla base di vari parametri e applicazioni.

È chiaro, tuttavia, che rispetto a queste metodologie e criteri rimangono delle questioni aperte, sulle quali si concentra in particolare l'analisi filosofica. Innanzitutto la questione posta dalla varietà delle procedure usate per costruire gli insiemi di dati (*data sets*) nelle ricerche climatiche, quali, per esempio, le interpolazioni statistiche, l'aggregazione dei dati provenienti da diverse fonti, le tecniche di correzione degli errori, i criteri di scelta dell'arco temporale considerato e via dicendo. Una variabilità dei dati o modelli di dati a cui si accompagna una pluralità degli stessi modelli climatici, la cui costruzione dipende sensibilmente dalle procedure d'idealizzazione e approssimazione seguite, di solito condizionate dallo scopo della ricerca in atto.

Strumenti ben consolidati

Allo stesso modo, nella valutazione dei modelli le metodologie da usare sono diverse a seconda degli intenti perseguiti: se, per esempio, si cerchino semplicemente conferme su come i modelli proposti si accordino con le conoscenze a disposizione (con il relativo problema di quali conoscenze vengano considerate rilevanti a tale scopo) o se si vogliano usare le simulazioni condotte in base a modelli per ottenere nuove conoscenze sui fenomeni climatici e, soprattutto, affidabili previsioni sugli andamenti futuri.

La filosofia della scienza ha uno strumentario concettuale e formale ben consolidato per affrontare questo ordine di questioni. In questo senso, può contribuire a una loro corretta trattazione, che permetta, in particolare, di evitare strumentali letture in chiave scettica o negazionista dell'influsso delle attività umane sul cambiamento climatico globale.

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Il significato di un nome

La storia della classificazione della specie *Homo erectus* ripercorre il dibattito sull'evoluzione del genere *Homo*

Dicevamo il mese scorso che *Homo erectus* è una specie umana estinta, che viene vista da molti paleoantropologi, me compreso, come la varietà umana arcaica che si è evoluta ed è a lungo sopravvissuta in Estremo Oriente – probabilmente solo in Estremo Oriente – forse fino alla diffusione, anche in Estremo Oriente, di *H. sapiens*.

In passato, lo stesso binomio (*Homo erectus*) veniva usato diversamente; ed è forse utile chiarire perché.

Un impeto lumper

La specie venne proposta fra le righe di un articolo del 1944 e poi, più esplicitamente, nel 1950 dal grande zoologo Ernst Mayr, scomparso ormai centenario nel 2005. Mayr è a buon diritto considerato uno dei massimi teorici dell'evoluzione, in particolare dei meccanismi che presiedono alla «speciazione», cioè alla formazione di nuove specie. Lo conosciamo in Italia soprattutto per il trattato del 1963, pubblicato da Einaudi nel 1970 con il titolo *L'evoluzione delle specie animali*, e per le riflessioni su storia e filosofia della biologia a cui si dedicò negli ultimi decenni della sua lunga vita.

In un impeto *lumper* – termine (contrapposto a *splitter*) a cui di solito si ricorre per indicare la tendenza di alcuni ricercatori a vedere poche specie sulla base del record fossile – Mayr si oppose al frazionamento proposto dai paleoantropologi dei primi decenni del Novecento, ritenendolo eccessivo oltre che spesso improprio, con nomi in latino usati come se fossero etichette dei reperti fossili. Suggerì così di raggruppare nel genere *Homo* e sotto la denominazione di *H. erectus* tutte le varietà umane estinte dell'Asia orientale: quelle che fino ad allora erano state attribuite a generi e specie differenti, quali *Pithecanthropus erectus* e *Sinanthropus pekinensis* (ma non solo). Un'unica specie umana arcaica, dunque, che manteneva (come convenzione vuole) l'appellativo specifico «erectus« attribuito ai primi resti scoperti nell'isola di Giava tra il 1891 e il 1892.

In questo modo, Mayr aderiva anche appieno alla visione gradualista della neonata teoria sintetica dell'evoluzione, di cui egli stesso era stato uno dei padri costituenti, in quanto la specie *H. erectus* veniva a rappresentare il contenitore in cui riunire buona parte delle conoscenze sulla documentazione fossile di esseri umani dalle fattezze arcaiche. Una vera e propria «fase» dell'evoluzione umana; non solo in Asia, dunque, ma anche altrove: in Africa, per esempio, e forse anche in Europa.

Coerentemente con l'impostazione sostenuta da Mayr, che divenne nel tempo quasi un dogma, molti autori si allinearono a questo modello lumper e anagenetico, dove si ipotizzava il graduale fluire di una specie arcaica (*H. erectus*) in una derivata (*H. sapiens*), con le sottospecie di cui abbiamo a lungo sentito parlare, come per esempio *H. sapiens sapiens*.

Una visione più ramificata

Per almeno mezzo secolo, questo è stato il modello di riferimento per l'evoluzione del genere *Homo* e tale è rimasto fino a pochi decenni fa. Anzi, sarebbe meglio dire fino a ieri, visto che il suo fantasma ancora aleggia in molta della divulgazione sull'evoluzione umana e, talvolta, anche nei manuali universitari e in certi articoli scientifici. È una modalità del processo evolutivo che comporta l'identificazione di una sola specie che muta gradualmente nel tempo, senza una nitida soluzione di continuità: un modello che ha preso il nome di «paradigma della specie unica».

Fortuna che, alla fine, molti paleoantropologi si lasciarono convincere dagli argomenti di un altro grande teorico della biologia evoluzionistica, Stephen Jay Gould, e molti passarono a una visione più ramificata (cladogenetica) del processo che ha condotto alla comparsa di *H. sapiens*. Ma qui mi fermo, anche perché di questo abbiamo già parlato altre volte.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

I punti oscuri dell'universo

Alcune misurazioni sembrano mettere in discussione il modello che descrive struttura e storia del cosmo

La cosmologia è in crisi? Da qualche anno a questa parte la domanda ricorre con una certa frequenza. È cominciato tutto intorno alla metà del decennio scorso. Fino ad allora, il modello cosmologico standard descriveva le varie osservazioni astrofisiche con un successo tale da essersi guadagnato il titolo di «modello di concordanza». Certo, il modello richiedeva ingredienti che nessuna teoria fisica accettata aveva previsto, e che nessuna osservazione in laboratori terrestri era in grado di spiegare: una misteriosa materia oscura, non visibile direttamente e diversa dalla materia atomica che ci è familiare; e una ancora più misteriosa energia oscura, presumibilmente associata al vuoto, che spingerebbe lo spazio a espandersi a ritmo accelerato.

Ma se si accettava l'ingombro di queste ipotesi aggiuntive, il risultato complessivo era notevole. L'accordo tra teoria e diversi dati astronomici era stupefacente.

Piccole crepe?

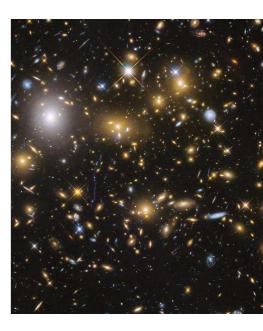
A un certo punto, però, l'accordo ha cominciato a mostrare segni di tensione. La prima spia del disagio è stata la misurazione della costante di Hubble, il parametro che quantifica il tasso di espansione attuale dell'universo. Tradizionalmente, una stima del valore della costante di Hubble richiede l'osservazione della distanza di galassie lontane e della velocità con cui appaiono allontanarsi da noi. Ma negli ultimi due decenni i cosmologi hanno misurato la costante di Hubble anche in maniera alternativa, tramite osservazioni ad alta risoluzione delle variazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo.

Inizialmente i due metodi davano risultati compatibili, entro gli errori di misura. Tuttavia, man mano che ciascun metodo ha ridotto il margine di incertezza, anche l'accordo si è ridotto, e attualmente le due diverse misurazioni sembrerebbero inconciliabili: da cui, i proclami sempre più insistenti e allarmati di una crisi in cosmologia.

A questo vanno aggiunti i ripetuti risultati che sollevano dubbi sulle ipotesi più «esotiche» del modello cosmologico standard. Per esempio, il fatto che l'espansione dell'universo stia accelerando (fatto che nel 2011 è valso il premio Nobel per la fisica ai suoi scopritori) è stato recentemente messo in discussione da studi che ne attribuiscono la spiegazione a differenze nella distribuzione di materia in diverse direzioni, come suggerito da Jacques Colin dell' Institut d'Astrophysique de Paris e colleghi su «Astronomy & Astrophysics» nel 2019, o a effetti sistematici nella misurazione delle distanze delle galassie, come affermano Yijung Kang della Yonsei University di Seoul e colleghi su «Astrophysical Journal» di gennaio di quest'anno.

Un desiderio nascosto

Che cosa bisogna concludere, dunque? È difficile dirlo, ma mi sembra interessante osservare che la questione potrebbe essere ribaltata. Se c'è una crisi, forse è nel fatto che da venti anni a questa parte non ci sono stati veri passi avanti in cosmologia. Nonostante tutto, il modello standard resta la migliore descrizione che abbiamo della struttura e della storia dell'universo. Ma i suoi punti più oscuri sono rimasti tali, e non si intravedono concreti segnali di una svolta.

Quando un campo di indagine entra nella maturità, la probabilità di «cambi di paradigma» rivoluzionari diventa sempre più piccola col passare del tempo, perché le soluzioni «semplici» sono già state vagliate e scartate. Forse, allora, interpretare ogni piccola anomalia come il segno di «nuova fisica» nasconde il desiderio del *deus ex-machina* che rimetta tutto in discussione, e che riaccenda l'entusiasmo per un campo di indagine in cui, un tempo, i progressi spettacolari erano all'ordine del giorno.

Spazio profondo. L'ammasso di galassie MACSJ0717.5+3745, a 5,4 miliardi di anni luce dalla Terra, in un'immagine ottenuta dal telescopio spaziale Hubble. In base ad alcuni studi recenti, l'espansione dell'universo sembra essere uno dei punti critici del modello standard che descrive il cosmo.

NASA/ESA/HST Frontier Fields team (STScI)

CLIMA

L'impronta del cambiamento

Il meteo globale porta i segni distintivi dell'alterazione climatica fin dal 2012

Lewis Tse Pui Lung/iStock

Attribuzioni più certe.
I cambiamenti su larga scala del meteo quotidiano ora sono rilevabili all'istante ed è quindi più facile individuarne il collegamento ai mutamenti del clima.

Clima e meteo non sono più così distinti. I climatologi hanno sempre rimarcato la distinzione tra l'andamento generale del clima e il meteo quotidiano: se oggi, qui, fa caldo o fa freddo, o si verifica un evento estremo, ciò non è imputabile con certezza al cambiamento climatico, i cui segni emergono invece inequivocabili dagli andamenti di lungo periodo. Ora però un gruppo guidato da Sebastian Sippel, climatologo all'ETH di Zurigo, mostra che il profilo complessivo del meteo globale, in una qualsiasi giornata, porta i segni distintivi del clima alterato.
Su «Nature Climate Change», Sippel analizza gli andamenti giornalieri di temperature e umidità su tutto il pianeta negli ultimi anni, e usa programmi di apprendimento automatico e modelli del clima per valutare come sono correlati, su scala quotidiana, mensile e annuale, a due misure importanti del cambiamento climatico: le temperature medie globali di superficie, e lo sbilancio tra l'energia che la Terra riceve dal Sole e quella che irradia nello spazio. Ebbene, risulta che fin dal 2012 il meteo globale di ogni singolo giorno è diverso da quello che sarebbe senza i cambiamenti del clima. E il segnale dell'influsso umano resta tangibile se non si considerano le temperature medie globali, ma solo la distribuzione spaziale del meteo nelle varie località. Se si considerano gli andamenti annui, i segni del cima alterato compaiono fin dal 1999.
In particolare, emergono due tendenze coerenti con quanto sappiamo sul clima che cambia. Il riscaldamento è più veloce sulle terre emerse che sul mare, cosa visibile soprattutto ai tropici dove la variabilità intrinseca è minore ed è quindi più facile attribuire gli scostamenti al clima mutato. Inoltre, l'umidità sta aumentando più in fretta ai tropici. «Questi due segnali sono in linea con le nostre aspettative su come i gas serra modificano lo stato termico della superficie nelle varie regioni, e indicano quindi meccanismi fisici plausibili che corroborano i risultati dell'analisi», osserva Seung-Ki Min, della Pohang University of Science and Technology in Corea del Sud, nel commento che accompagna lo studio.
L'analisi ha ovviamente i suoi limiti, riconoscono gli autori, che si dicono già al lavoro per perfezionarla. Per esempio non considera fenomeni climatici a bassa frequenza, come le oscillazioni decennali o multidecennali della temperatura superficiale degli oceani, o gli influssi dei cambi d'uso delle terre o delle attività vulcaniche. Nondimeno, lo studio «apre nuove prospettive anche per la comunicazione degli eventi meteorologici regionali e della loro attribuzione al clima che cambia», spiegano gli autori. «Resta vero che i cambiamenti nel meteo di una singola località si dispiegano nell'arco di decenni, ma il cambiamento su larga scala è ora rilevabile all'istante».

Giovanni Sabato

ASTRONOMIA

Oggetti insoliti al centro della Via Lattea

Si tratta di una nuova classe di oggetti, in orbita attorno al buco nero SgrA*

Sembrano nubi di gas, ma si comportano come stelle, tanto da costringere gli autori della scoperta a inventarsi una nuova classe di oggetti astrofisici, identificata con la lettera G. Stiamo parlando degli strani oggetti individuati in orbita attorno al buco nero supermassiccio che si trova al centro della nostra galassia, descritti nello studio pubblicato su «Nature» da un gruppo guidato dall'italiana Anna Ciurlo, dell'Università della California a Los Angeles.

Osservando la Via Lattea in direzione del Sagittario, si trova la radiosorgente complessa più intensa di quella costellazione, Sagittarius A, al cui interno si trova una sorgente molto compatta e luminosa, nota come Sagittarius A* (Sgr A*): è qui, negli 0,1 parsec centrali della Via Lattea (1 parsec equivale a 3,26 anni luce), che si trova il buco nero supermassiccio della nostra Galassia. Ed è qui, in orbita stretta proprio attorno a Sgr A*, che già nel 2005 gli astrofisici avevano individuato il primo di due oggetti, la sorgente G1 (G2 è stata individuata nel 2012), aventi un'emissione simile a quelle delle nubi di gas e polveri, ma con proprietà dinamiche tipiche degli oggetti di massa stellare. Più di recente, grazie a osservazioni effettuate con i telescopi Keck, alle Hawaii, Ciurlo e collaboratori hanno individuato altri quattro oggetti di questo tipo, nominati da G3 a G6, tutti con orbite comprese entro 0,04 parsec dal buco nero e con periodi orbitali fra 100 e 1000 anni.

Gli autori ipotizzano che ogni oggetto G sia un sistema binario composto da due stelle in fusione tra loro, avvolte da un'estesa nube di gas e polveri che le nasconde alla vista. Ad alterarne periodicamente l'aspetto, a seconda della distanza orbitale, sarebbe la forte interazione mareale con il buco nero supermassiccio. Ma attendono conferma da ulteriori osservazioni su nuovi candidati già individuati.

Emiliano Ricci

Il neutrino di Majorana sfugge ancora

C'è ancora da attendere per capire se il neutrino è una particella di Majorana. È quello che emerge dai nuovi risultati dell'esperimento CUORE, ai Laboratori nazionali del Gran Sasso dell'Istituto nazionale di fisica nucleare, il cui obiettivo è rilevare un processo molto raro, il «doppio decadimento beta senza emissione di neutrini»: la sua esistenza dimostrerebbe che il neutrino, particella elettricamente neutra e di massa piccolissima, coincide con la sua antiparticella, ossia l'antineutrino. Le particelle che soddisfano questa proprietà sono dette «di Majorana», dal nome del fisico italiano (misteriosamente scomparso nel 1938) che per primo ne teorizzò l'esistenza. I risultati di CUORE, raccolti in oltre due anni di presa dati, tra il 2017 e il 2019, sono stati per ora pubblicati sulla piattaforma *on line* arXiv.org.

L'esperimento consiste di un rivelatore molto sensibile formato da quasi 1000 cristalli cubici di biossido di tellurio, disposti all'interno di 19 speciali «torri» di rame. Per studiare i dati raccolti dal rivelatore, i ricercatori hanno sviluppato un algoritmo molto raffinato, in grado di amplificare i segnali rilevati e identificare quelli spuri, ossia riconducibili a processi diversi da quello cercato: tuttavia, pur eliminando il «rumore di fondo», non è emersa alcuna prova del decadimento che gli scienziati speravano di osservare. Ciò significa che, se questo processo raro esiste, per rivelarlo servirà raggiungere un livello di sensibilità ancora maggiore.

Riuscire a osservarlo avrebbe conseguenze molto importanti sulla comprensione della natura dei neutrini (tra cui una misura precisa della loro massa), ma non solo: come hanno sottolineato i ricercatori, l'esistenza del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini potrebbe gettare luce anche sul problema dell'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo.

La sfida ora continua: CUORE continuerà a operare per alcuni anni, per lasciare poi spazio a CUPID, una variante di nuova generazione che aumenterà la sensibilità dell'esperimento.

Matteo Serra

SPL/AGF

ASTRONOMIA

Un baby boom stellare

Scoperto grazie al più antico materiale solido mai trovato

Scott Camazine/Alamy Stock Photo

Miliardi di anni prima della formazione del nostro sistema solare, le stelle nascevano a un ritmo accelerato. Le prove di questo *baby boom* stellare sono state scoperte da Philipp R. Heck, del Field Museum di Chicago, e colleghi nel cuore del meteorite Murchison (*nella foto*), caduto in Australia 51 anni fa. Oltre a contenere molti amminoacidi, il meteorite Murchison si è rivelato uno scrigno di grani presolari (cioè più antichi del Sole), rari e minuscoli frammenti di polvere di stelle presenti solo nel cinque per cento dei meteoriti caduti sulla Terra.

Come gli esseri viventi, anche le stelle hanno un ciclo vitale. Nascono dagli ammassi fluttuanti di gas e polveri delle nebulose, bruciano per miliardi di anni e infine muoiono, lanciando nello spazio le polveri che andranno a formare nuove stelle oppure pianeti, lune e meteoriti come il Murchison. Una volta isolati, i grani presolari hanno rivelato la loro età e il tipo di stelle da cui provengono. Gli elementi che contengono sono il risultato dell'esposizione ai raggi cosmici, particelle ad alta energia che penetrano nella materia solida, modificandola. Maggiore è l'esposizione, più elementi si formano.

I risultati dell'analisi, pubblicati sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», indicano che la maggior parte dei grani ha un'età compresa tra i 4,6 e i 4,9 miliardi di anni. Alcuni superano i 5,5 miliardi di anni (uno in più della Terra) e sono quindi il materiale solido più antico mai scoperto. Ma i grani presolari forniscono molte altre informazioni. Ora sappiamo che possono fluttuare a lungo nello spazio in grandi ammassi. La loro abbondanza nel Murchison, poi, suggerisce che circa sette miliardi di anni fa ci fu un periodo di intensa formazione stellare. Cade quindi l'ipotesi di una nascita costante di stelle tra le nebulose della nostra galassia.

Eugenio Melotti

Il campo magnetico primordiale della Terra

Il nostro pianeta era dotato di un campo magnetico già 4,2 miliardi di anni fa, e questo campo era già sufficientemente intenso da proteggere l'atmosfera terrestre e prevenire la rimozione dell'acqua, quando l'attività solare era sicuramente più intensa. Ad affermarlo è il gruppo guidato da John Tarduno, dell'Università di Rochester, negli Stati Uniti, che ha pubblicato uno studio sui «Proceedings of the National Academy of Sciences». In una ricerca precedente, Tarduno aveva mostrato che il campo geomagnetico attuale ha un'origine piuttosto recente, risalendo a 565 milioni di anni fa, quando si formò il nucleo interno solido, e poté così avviarsi la dinamo generata dal moto del nucleo esterno composto da ferro liquido, che produce le correnti necessarie ad alimentare il campo magnetico del nostro pianeta. Occorreva quindi trovare la sorgente del paleomagnetismo terrestre. I ricercatori l'hanno individuata analizzando campioni raccolti in Australia di cristalli di zirconio, il materiale terrestre più antico. All'origine del campo paleomagnetico, secondo Tarduno e colleghi, ci sarebbe stata la precipitazione chimica all'interno della Terra dell'ossido di magnesio prodotto in conseguenza dell'impatto fra il nostro pianeta e il corpo planetario Theia da cui nacque la Luna.

Emiliano Ricci

NUCLEARE

Fusti pericolosi

Lo stoccaggio di rifiuti radioattivi non è a prova di corrosione

I materiali impiegati nell'isolamento dei rifiuti nucleari potrebbero degradarsi molto più rapidamente di quanto previsto finora.

I risultati di uno studio coordinato da Xiaolei Guo della Ohio State University, pubblicati su «Nature Materials», mettono in discussione l'attuale standard di sicurezza, tarato sulla corrosione dei singoli materiali ma non sulla loro interazione. Buona parte delle nazioni industrializzate progetta di dotarsi di un deposito in strati geologici profondi in cui confinare i rifiuti ad alta attività. Questa soluzione, considerata la migliore allo stato dell'arte, prevede l'individuazione di siti geologi particolarmente stabili che possano schermare la radioattività per milioni di anni tramite barriere passive. Per questa ragione, le scorie devono essere processate, annegate in una matrice inerte come vetro o ceramica e infine sigillate in fusti di acciaio inossidabile prima dello stoccaggio.

In una simulazione di laboratorio di durata mensile, i ricercatori hanno esaminato il tasso di corrosione tra la superficie interna dei fusti e quella dei materiali ad alta attività. Se con il trascorrere del tempo l'integrità del fusto venisse intaccata e dovesse percolare acqua all'interno, tra acciaio e ceramica si creerebbe un ambiente chimico estremamente aggressivo. La liberazione di cationi metallici, cioè ioni con carica elettrica positiva, e la conseguente idrolisi, spingerebbero il pH dell'interstizio a valori sempre più bassi. La spiccata acidità innescherebbe nei punti di contatto la corrosione di vetro o ceramica e accelererebbe quella dell'acciaio, favorendo la liberazione di materiale radioattivo nell'ambiente.

«I risultati dimostrano che i metodi attuali potrebbero non essere sufficienti per conservare questi rifiuti in modo sicuro; dobbiamo trovare qualcosa di diverso», ha commentato Guo.

Davide Michielin

L'effetto serra dei CFC riscalda il Polo Nord

Non è solo la fusione dei ghiacci che amplifica l'aumento di temperatura al Polo Nord. Uno studio di Lorenzo Polvani, della Columbia University di New York, e collaboratori, pubblicato su «Nature Climate Change», analizza il ruolo dei clorofluorocarburi (CFC), composti noti per la loro capacità di distruggere l'ozono stratosferico, sull'aumento delle temperature in Artico.
Dal 1955 la concentrazione di CFC in atmosfera è molto aumentata, iniziando poi a diminuire alla fine del secolo per il bando di queste sostanze imposto dal protocollo di Montreal, entrato in vigore nel 1989. I ricercatori hanno simulato l'andamento della temperatura nella zona artica tra il 1955 e il 2005, prima sotto gli influssi esterni reali di origine antropica, poi tenendo fissi due fattori – le concentrazioni di CFC e di ozono stratosferico – ai valori che avevano nel 1955. Fissando questi fattori si riscontra un aumento di soli 0,82 °C, mentre il loro inserimento con valori reali fa schizzare la temperatura a +1,59 °C, simile a quanto accaduto in realtà. E la distruzione dell'ozono stratosferico conta poco, mentre è importante l'assorbimento di calore nella bassa atmosfera dovuto ai CFC. Quindi un protocollo di Montreal migliorato aiuta anche nella lotta al cambiamento climatico.

Antonello Pasini

Ulrich Baumgarten/Getty Images

BIOINGEGNERIA

L'alba degli xenorobot

Cellule di rana e simulazioni al computer per la nascita dei primi robot biologici

Organismi viventi riprogrammabili, ovvero una nuova classe di artefatti, né animali né robot in senso tradizionale. Così gli autori di un lavoro che ha tutte le carte in regola per «fare storia» hanno descritto la loro creazione. Il nome preciso è xenorobot: si tratta dei primi biorobot costruiti a partire da «pezzi» di cellule (nello specifico di rane della specie *Xenopus laevis*, da cui il nome). Sam Kriegman dell'Università del Vermont a Burlington e colleghi scrivono sui «Proceedings of the National Academies of Sciences» che questa è la prima volta che vengono create macchine biologiche a partire da zero.

Non sono propriamente vivi, ma possono muoversi, dirigendosi magari verso un obiettivo, il che li renderebbe utili per la medicina di precisione poiché potrebbero trasportare farmaci esattamente dove sono necessari nell'organismo. Sono anche in grado autoripararsi se vengono danneggiati. Quando poi muoiono si decompongono senza creare rifiuti dannosi. La tecnica con cui sono stati ottenuti è ingegnosa, una perfetta combinazione fra fasi di lavorazione *in silico*, cioè in simulazioni al computer, e *in vitro*. Mesi di calcoli con un supercomputer sono serviti per creare un numero enorme di «progetti» di biorobot a partire da simulazioni di cellule cardiache ed epidermiche di rana. I biorobot dovevano svolgere una funzione, la locomozione per esempio.

Fra tutti i prototipi simulati sono stati scelti quelli che eseguivano meglio il compito. Questi sono poi serviti da modello per i ricercatori, che, usando le cellule in coltura, hanno assemblato concretamente le macchine cercando di essere più fedeli possibile alla simulazione. Con un microbisturi le cellule sono state tagliuzzate e poi ricomposte in queste «macchine biologiche» che avevano forme mai osservate in natura.

Federica Sgorbissa

Holly Mahaffey Photography/Getty Images

Malattie trasmissibili con il microbiota

«Le malattie non trasmissibili sono trasmissibili?». È chiara fin dal titolo l'ipotesi proposta su «Science» da un gruppo canadese guidato da Brett Finlay, microbiologo all'Università della British Columbia di Vancouver.

Le malattie non trasmissibili si attribuiscono a cause genetiche, fattori ambientali o stili di vita. Ma sempre più indizi puntano anche a un altro responsabile: i microbi. In persone con molte di queste malattie si stanno scoprendo alterazioni della comunità microbica con cui conviviamo (il microbiota), in particolare dei batteri intestinali. E in vari casi, animali sani, se ricevono microbi intestinali alterati, sviluppano anch'essi la malattia. La composizione del microbiota di un individuo, d'altronde, è influenzata da quella dei consimili con cui entra a contatto. «Noi proponiamo che alcune malattie non trasmissibili possano avere tra le loro cause una componente microbica, e siano trasmissibili tramite il microbiota», afferma Finlay.

L'obesità per esempio è un fattore di rischio importante per molte malattie non trasmissibili, e ci sono prove crescenti che vi contribuisca una componente microbica: ci sono varie prove che si trasmetta con i microbi negli animali, e ci sono indizi che lo faccia anche negli esseri umani. Chi ha un amico obeso, per esempio, ha il 57 per cento di probabilità in più di diventarlo anche lui. Lo stesso vale per diabete, malattie cardiovascolari e malattie infiammatorie intestinali, per le quali, oltretutto, alcuni fattori di rischio genetici riguardano funzioni immunitarie che influenzano la composizione del microbiota intestinale.

Molto resta da appurare, a partire da quanto sia davvero trasmissibile il microbiota umano, fenomeno su cui abbiamo solo indizi. Finlay propone dunque una serie di test per mettere alla prova l'ipotesi, ed è convinto che ne valga la pena: «È un filone che potrebbe avere grandi implicazioni per la prevenzione e i trattamenti delle più importanti malattie odierne».

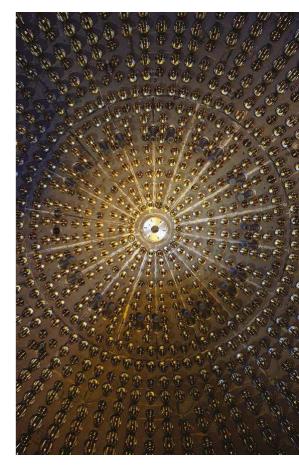
Giovanni Sabato

Le reti dell'eterna giovinezza del nematode

Un'aspettativa di vita quintuplicata, che vedrebbe quindi aumentare la vita media dell'essere umano da 80 a 400 anni circa, sembra uno scenario piuttosto fantasioso, eppure qualcosa di simile è stato appena sperimentato su un organismo modello per la ricerca di base.
Agendo su due dei principali meccanismi cellulari che governano l'invecchiamento, alcuni ricercatori sono riusciti a prolungare la vita media del nematode *Caenorhabditis elegans* da quattro settimane a cinque mesi circa. L'effetto sinergico di una doppia mutazione, rispettivamente nella via di segnalazione dell'insulina (indicata con la sigla IIS) e in un enzima chiamato «bersaglio della rapamicina» (TOR), sembra avere un effetto esponenziale sul processo di invecchiamento rispetto alle mutazioni prese singolarmente. Se è la sola via di segnalazione dell'insulina a subire la mutazione, per esempio, il nematode raddoppia la vita, mentre quando è la via di segnalazione di TOR a essere alterata la speranza di vita di *C. elegans* è in media del 30 per cento più lunga.
Lo studio, pubblicato su «Cell Reports» da Di Chen, della cinese Nanjing University, e colleghi, apre potenzialmente la strada a un approccio allo sviluppo di trattamenti contro l'invecchiamento che non interessano solamente i singoli circuiti, ma le reti che questi formano. (*MaMa*)

Lo sguardo di Borexino nelle profondità della Terra

L'idea di indagare l'interno della Terra osservando i neutrini emessi dai decadimenti degli elementi radioattivi venne per la prima volta nel 1953 a George Gamow e Fred Reines, ma solo ora, a quasi settant'anni di distanza, è stato finalmente possibile rivelarli con certezza e determinarne l'origine. A riuscire nell'impresa è stata la collaborazione Borexino, ovvero il gruppo di ricercatori che lavora all'esperimento Borexino, operativo presso i Laboratori nazionali del Gran Sasso dell'Istituto nazionale di fisica nucleare.

Dopo un lavoro di acquisizione di oltre dieci anni di dati e una complessa analisi per separarli da altri segnali (come i neutrini provenienti dal Sole), il gruppo ha pubblicato su «Physical Review D» la conferma definitiva dell'esistenza dei cosiddetti geoneutrini, in realtà antineutrini (antiparticelle dei neutrini) originati dai decadimenti beta degli elementi radioattivi uranio-238 e torio-232. Questi due elementi si trovano nel mantello terrestre (lo spesso strato caldo che si trova subito sotto il sottile strato di crosta) ed è proprio l'energia liberata da questi decadimenti a contribuire alla produzione di oltre la metà del calore terrestre e di conseguenza ad alimentare in maniera significativa fenomeni come vulcani, terremoti e campo geomagnetico. (*EmRi*)

È in Australia il cratere più antico

Yarrabubba si trova in Australia, non lontano dalla costa occidentale dell'isola. Una ricerca di Timmons M. Erickson, del Johnson Space Center della NASA, e colleghi dell'Università di Curtin, pubblicata su «Nature Communications», ha stabilito che è il cratere da impatto più antico della Terra: ha due miliardi e 229 milioni di anni. Il cratere è poco visibile, sebbene abbia un diametro di 70 chilometri, perché i bordi sono stati modificati dagli agenti atmosferici. A tenere traccia della sua storia, però, ci sono le «impattiti», rocce fuse nel momento dell'impatto con il meteorite e nuovamente cristallizzate poco dopo. I ricercatori hanno studiato le concentrazioni di uranio e piombo in queste rocce, in particolare nei minerali zirconi e monaziti. Così, risalendo al periodo della cristallizzazione, hanno potuto datare l'impatto.
Ma c'è di più: l'età di Yarrabubba coincide con la fine delle glaciazioni dell'era Paleoproterozoica, iniziata 2,5 miliardi di anni fa. I modelli rivelano che, vista la grandezza del cratere, il meteorite potrebbe aver generato l'emissione di oltre 200.000 miliardi di chilogrammi di vapore acqueo in atmosfera, che avrebbero modificato il clima, contribuendo al riscaldamento del pianeta e alla fine dell'era glaciale. (*GiAs*)

SPL/AGF (*Borexino*); Wendy Eriksson/shutterstock (*cratere Yarrabubba*)

Un cuore cyborg, metà naturale e metà sintetico

Nel lungo impegno degli scienziati per realizzare un cuore artificiale che sia una copia fedele di quello umano, c'è sempre stato un problema: i cardiomiociti, cioè le fibre muscolari striate che generano il battito, sono orientati e intrecciati tra loro in uno schema troppo complesso da riprodurre in un materiale sintetico. Ora, però, un gruppo di ricercatori affiliati a università statunitensi, europee e di Singapore, e coordinato da Clara Park, del Massachusetts Institute of Technology di Boston, ha proposto in un articolo su «Science Robotics» una soluzione ingegnosa: un organo bioibrido, realizzato avvolgendo la parte interna del cuore di un maiale in un miocardio artificiale, fatto di uno speciale tessuto attivato ad aria compressa e fissato sul cuore del maiale con uno speciale silicone adesivo.

«L'obiettivo – spiega Park – è creare un modello in grado di replicare fedelmente il cuore umano per ridurre l'impiego di animali nei test preclinici e di certificazione di dispositivi come *pacemaker* e defibrillatori. I modelli artificiali non riproducono in modo preciso la struttura del cuore interno, mentre gli organi prelevati dagli animali si deteriorano rapidamente». Al momento è stato realizzato con successo il ventricolo sinistro. (*RiOl*)

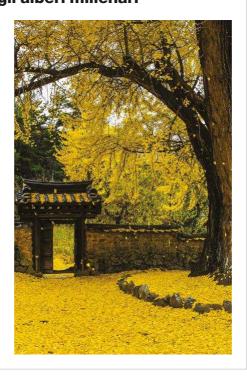
L'apnea dei Neanderthal a pesca di molluschi

Un bel respiro e giù sott'acqua a raccogliere fasolari (*Callista chione*), molluschi bivalvi che vivono infossati nei fondali del Mar Mediterraneo. A cimentarsi nelle immersioni furono i Neanderthal, come ha scoperto un gruppo di ricerca per metà italiano coordinato dall'archeologa Paola Villa dell'Università del Colorado a Boulder. Ecco spiegato perché molti Neanderthal avevano canali uditivi con escrescenze ossee, come mostrano i loro resti fossili. Si tratta delle cosiddette orecchie da nuotatore, tipiche di chi passa molto tempo in acqua.

Tornando allo studio, pubblicato su «PLOS One», sono stati osservati al microscopio i gusci di 167 fasolari recuperati dai sedimenti della grotta dei Moscerini, sito neanderthaliano vicino Gaeta, nel Lazio meridionale. Analizzando opacità delle valve, conservazione, presenza di abrasioni o resti di organismi marini incrostanti, i ricercatori hanno concluso che il 23,9 per cento non era stato raccolto sulla spiaggia, ma dal fondo del mare. Con le conchiglie i Neanderthal fabbricavano utensili taglienti, e forse ne mangiavano i molluschi. Nella grotta sono state trovate anche una cinquantina di pomici, la prima volta per un sito neanderthaliano, che probabilmente venivano usate per esfoliare la pelle. (*MaSa*)

Il segreto della longevità degli alberi millenari

Alcuni superano il millennio di età, altri sono *hibakujumoku*, cioè alberi sopravvissuti alle bombe atomiche. Eppure, i meccanismi alla base della straordinaria longevità e resistenza del *Ginkgo biloba*, antichissima pianta originaria dell'Asia orientale, rimangono poco chiari. Sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», Jinxing Lin della cinese Beijing Forestry University, e colleghi hanno esaminato i cambiamenti molecolari e metabolici di 34 ginkgo di età compresa tra 15 e 667 anni. Il sequenziamento dell'RNA di cellule del principale tessuto di crescita vegetale ha confermato il declino nell'espressione di geni coinvolti nella divisione, espansione e differenziamento cellulare. Ma i cambiamenti non sono stati accompagnati da una maggiore espressione di quelli legati alla senescenza: l'aumento dell'età non affligge significativamente area fogliare, efficienza fotosintetica, tasso di germinazione dei semi o incremento dell'area basale. Il confronto tra il cambio di alberi giovani e vecchi ha mostrato livelli di espressione simili per i geni associati a molecole protettive. (*DaMi*)

VDCM image/iStock

Organoidi per produrre veleno dei serpenti

Gli organoidi, ovvero versioni miniaturizzate degli organi prodotte *in vitro*, possono essere usati per un obiettivo inaspettato: produrre il veleno dei serpenti. La notizia arriva dai Paesi Bassi, dove un gruppo di ricercatori dell'Hubrecht Institute di Utrecht è riuscito a ricreare in laboratorio ghiandole velenifere del serpente corallo del Capo (*Aspidelaps lubricus cowlesi*), una specie che vive tra Angola, Namibia e Sudafrica.
Gli autori della ricerca, pubblicata su «Cell», hanno «coltivato» in laboratorio parti di tessuto di vari organi, prelevate da serpenti non ancora nati, e in poche settimane hanno ottenuto ghiandole perfettamente funzionanti. Il metodo offre nuove possibilità per la produzione di antidoti contro il veleno dei serpenti e per lo sviluppo di farmaci basati sulle tossine del siero velenoso, come quelli usati per abbassare la pressione sanguigna o per prevenire le emorragie.
Attualmente le difficoltà nello sfruttare appieno il veleno dei serpenti sono legate al pericoloso processo di «mungitura» per prelevarlo. In tutto il mondo «più di 100.000 persone muoiono ogni anno per il morso di un serpente, eppure i metodi di produzione degli antidoti sono fermi al secolo scorso», ha detto Hans Clevers, coautore della ricerca. Secondo lo scienziato, questa tecnica sarebbe molto più efficiente e sicura. (*EnNi*)

SPAZIO

Anche se la Via Lattea fosse attraversata da alieni che navigano nello spazio, non dovremmo essere sorpresi se la Terra non riceve visite

L'arcipelago galattico

di Caleb Scharf

Caleb Scharf è il direttore del Columbia Astrobiology Center e autore di vari libri, tra cui *Il complesso di Copernico* (Codice Edizioni, 2015) e *The Zoomable Universe* (Atlantic Books, 2017). Sul sito web di «Scientific American» ha un blog, *Life, Unbounded*, e ha scritto per molte altre pubblicazioni. Vive a New York con la moglie e due figlie.

Il 15 gennaio 1790 nove ammutinati della nave *HMS Bounty*, 18 tahitiani e una bambina arrivarono sull'isola di Pitcairn, uno dei luoghi abitabili più isolati della Terra. Circondata dall'Oceano Pacifico meridionale, separata dalle isole più vicine da centinaia di chilometri di mare aperto, Pitcairn è sinonimo di solitudine.

Prima della comparsa degli ammutinati del *Bounty*, l'isola potrebbe non aver visto alcun segno di occupazione umana fin dal XV secolo, quando era ancora popolata da polinesiani. Quella comunità visse forse per secoli, culminati a quanto pare con un esaurimento delle risorse naturali, oltre a conflitti su altre isole lontane che interruppero le rotte di commercio e rifornimenti, provocando l'estinzione degli occupanti umani di Pitcairn. Quello che, almeno all'apparenza, era un luogo abitabile era diventato insostenibile, fino all'arrivo del *Bounty* in quel giorno fatidico del 1790. Stranamente, ci vollero altri 18 anni affinché un'altra nave gettasse l'ancora a Pitcairn, anche se i colonizzatori documentarono avvistamenti di imbarcazioni che passavano in lontananza.

La storia di Pitcairn è solo un esempio estremo delle dinamiche insolite dell'occupazione umana nel Pacifico meridionale. Nelle regioni di Polinesia, Micronesia e Melanesia ci sono decine di migliaia di isole, sparse su milioni di chilometri quadrati di oceano. Molte sono poco più che sporgenze di roccia e corallo, e anche tra i luoghi abitabili non tutti sono abitati in un determinato momento. Nel complesso però rappresentano un enorme scenario potenziale di insediamento e civiltà per le persone motivate a navigare sulle distese d'acqua della Terra.

Ci sono paralleli sorprendenti tra questo ambiente, senza dubbio terrestre, e quello che ci circonda nello spazio. La galassia della Via Lattea potrebbe comprendere addirittura 300 miliardi di stelle. Le stime più precise ottenute dalle missioni di ricerca degli esopianeti, come quelle effettuate con il telescopio spaziale Kepler della NASA, ci fanno ritenere che in questo oceano di corpi celesti possano esserci oltre dieci miliardi di piccoli mondi rocciosi in configurazioni orbitali che favoriscono condizioni temperate in superficie. Come le isole della Terra, questi puntini esoplanetari potrebbero tanto generare quanto sostenere sistemi viventi e offrire una rete di tappe intermedie per eventuali specie intenzionate a migrare nello spazio interstellare. Ed è qui che la situazione si fa davvero interessante.

Proprio come gli europei occidentali finirono col capire che i popoli del Pacifico meridionale si erano diffusi attraverso migliaia di chilometri di oceano su imbarcazioni semplici, scivolando sull'acqua a pochi nodi di velocità, oggi possiamo vedere che espandersi nella nostra galassia non richiede molto più che perseveranza e una quantità modesta di tempo cosmico.

Più soluzioni per un enigma

A riconoscerlo per primo fu Enrico Fermi, in un famoso episodio del 1950. Si racconta che, durante un pranzo con altri scienziati, Fermi esclamò: «Non vi siete mai chiesti dove sono tutti quanti?» In questo caso «tutti» significava qualunque specie viaggiante nel cosmo, e la domanda col tempo si è trasformata nell'altrettanto famoso paradosso di Fermi (nonostante questo termine sia poco appropriato): a meno di essere estremamente rare, le specie avanzate sotto l'aspetto tecnologico ormai si sarebbero dovute diffondere pressoché in tutta la galassia, eppure non vediamo traccia della loro esistenza. Fermi, noto per la sua capacità di eseguire rapidamente calcoli approssimativi su pezzi di carta, aveva valutato grosso modo che la Via Lattea si potesse colonizzare in un battito di ciglia cosmico, quando ogni tic dell'orologio equivale a milioni di anni.

Nel 1975 l'astrofisico Michael Hart ha realizzato il primo studio dettagliato di questa idea con quantità precise, presentando quello che ha assunto il nome di «fatto A» di Hart: l'attuale assenza di alieni sulla Terra. Questo fatto indiscutibile (per la maggior parte delle persone di buon senso) ha portato Hart a concludere che nella nostra galassia attualmente non esista – o non sia mai esistita – alcuna altra civiltà tecnologica. Questa affermazione, proprio come l'idea originale di Fermi, si basa sul tempo relativamente breve che a quanto pare ci vorrebbe a una specie per diffondersi nei 100.000 anni luce di diametro della Via Lattea, perfino usando sistemi di propulsione modesti, molto più lenti della luce.

Il problema è stato studiato anche dal fisico Frank Tipler, che

IN BREVE

In base a semplici estrapolazioni si può ritenere che, se nella Via Lattea ci sono altre civiltà itineranti nello spazio, potrebbero diffondersi in tutta la galassia a velocità sorprendente. Allora perché non abbiamo trovato prove inconfutabili della presenza di alieni sulla Terra?

Le risposte popolari a questo enigma – che siamo soli, che i viaggi interstellari sono impossibili, che gli alieni si nascondono da noi – si basano tutte su presupposti che appaiono poco plausibili.

La spiegazione più probabile dell'apparente solitudine della Terra potrebbe essere che l'insediamento galattico avvenga a ondate, e che la nostra specie sia comparsa su un pianeta isolato in una pausa nell'esplorazione interstellare.

nel 1980 ha scritto un resoconto del proprio lavoro dimostrando, come Hart, che alieni abbastanza motivati potrebbero effettivamente arrivare dappertutto in pochi milioni di anni. Dato che il nostro sistema solare esiste da 4,5 miliardi di anni e che la Via Lattea si formò almeno 10 miliardi di anni fa, è trascorso un tempo più che sufficiente perché le specie arrivassero su tutti i mondi abitabili.

Un aspetto essenziale però è che queste ricerche hanno considerato la diffusione della vita in termini piuttosto diversi. Hart ha ipotizzato un processo di insediamento «in carne e ossa» da parte di una specie biologica, mentre Tipler ha immaginato sciami di sonde autoreplicanti in viaggio tra le stelle, che si diffonderebbero senza sosta. In gran parte degli scenari di insediamento i sistemi stellari e i loro pianeti vengono abitati, se non lo erano già, e poi diventano la prossima base operativa da cui lanciarsi verso nuovi sistemi. Per le macchine autoreplicanti di Tipler, il limite principale all'espansione sarebbe la disponibilità di energia e materie prime a sufficienza per produrre ogni generazione successiva.

Questi approcci radicalmente diversi evidenziano quanto sia difficile fare affermazioni significative sulla migrazione interstellare. Qualunque studio di questo tipo comprende sempre molti presupposti di ampia portata: alcuni sono ragionevoli e facili da giustificare, altri sono più insidiosi. Per esempio, tutti gli scenari includono ipotesi sull'entità della tecnologia usata per i viaggi interstellari. Inoltre, quando la specie è «in viaggio», invece di lanciare sofisticati emissari robotici, il presupposto essenziale è che gli esseri viventi possano sopravvivere a un qualsiasi tipo di viaggio interstellare.

Espandersi nella nostra galassia non richiede molto più che tenacia e una quantità modesta di tempo cosmico

Sappiamo che viaggiare anche solo a un misero 10 per cento della velocità della luce richiede una tecnologia davvero incredibile, per esempio una propulsione a fusione nucleare o enormi vele fotoniche al laser. Inoltre deve esserci una protezione dall'impatto con gli atomi dei gas interstellari, in grado di erodere lo scafo, oltre che dai frammenti di roccia che potrebbero distruggere un'astronave: ciascuno ha la potenza di una bomba per un veicolo spaziale con una velocità minimamente paragonabile a quella della luce. Viaggiare a velocità più modeste è potenzialmente molto più sicuro, ma porta a tempi di percorrenza tra le stelle di secoli o millenni, ed è tutt'altro che evidente come sarebbe possibile mantenere vivo e vegeto un equipaggio per periodi di tempo che potrebbero andare ben oltre la durata di una singola vita umana.

I presupposti più controversi però riguardano la motivazione e le nostre proiezioni sulla durata di intere civiltà e dei loro insediamenti. Per esempio, basta che a una specie aliena non interessi raggiungere altre stelle per fermare del tutto l'idea degli insediamenti galattici. Questa argomentazione è stata presentata da Carl Sagan e William Newman nel 1983 per confutare quello che definivano l'«approccio solipsista» all'intelligenza extraterrestre. Ma come fa notare il mio collega astronomo Jason Wright, forse questo tipo di affermazione è di per sé una «fallacia monoculturale». Per dirla in altri termini, appare impossibile fare ipotesi con un minimo di precisione sul comportamento di un'intera specie come se pensasse con un'unica mente. Noi umani senz'altro non rientriamo in quella circostanza. E anche se la massima parte delle presunte civiltà itineranti della Via Lattea non intraprendono diaspore galattiche, ne basterebbe una sola in controtendenza per diffondere segnali di vita e tecnologia in centinaia di miliardi di sistemi stellari.

In realtà la storia del paradosso di Fermi è piena di svariati dibattiti intorno ai presupposti su cui si basa, oltre a un'enorme varietà di «soluzioni» ipotizzate. Poche di queste – o forse nessuna – sono facilmente verificabili. Alcune includono idee piuttosto semplici, mentre altre sono pura fantascienza. Per esempio, può darsi che conquistare la capacità di attraversare rapidamente lo spazio interstellare abbia un costo eccessivo in termini di risorse, anche per una specie con un altissimo livello tecnologico. Questo sicuramente ridurrebbe il numero degli esploratori e spiegherebbe il fatto A di Hart. O forse la crescita demografica non è, come hanno ipotizzato molti ricercatori, una motivazione valida per viaggiare tra le stelle, soprattutto per una specie in grado di resistere agli impulsi rapaci e sviluppare nel suo sistema di origine un modo di vivere sostenibile. La rivoluzione verde definitiva eliminerebbe la spinta ad andare oltre per qualcosa di diverso dall'esplorazione scientifica.

Suonano più sinistri i concetti come quello del «grande filtro»: l'idea che ci sia sempre qualcosa a porre limiti a una specie, forse un'inevitabile incapacità di arrivare a quella rivoluzione verde, provocando un'estinzione implosiva di tutte le forme di vita potenzialmente tecnologiche. In alternativa potrebbero essere i cataclismi naturali, dalle esplosioni di supernove ai lampi provenienti dal buco nero al centro della Via Lattea, a sfoltire periodicamente la vita galattica, abbastanza da impedirne la diffusione.

Tra le proposte più stravaganti troviamo l'ipotesi dello zoo. In questo scenario, dei poteri forti alieni ci tengono deliberatamente isolati e all'oscuro. E non manca quello che mi piace definire lo scenario paranoico: le altre civiltà esistono, ma si nascondono l'una dall'altra e si rifiutano di comunicare a causa di una qualche xenofobia cosmica.

Forse però ci sono modi più semplici per spiegare la nostra ignoranza attuale sugli alieni. Queste risposte potrebbero avere caratteristiche in comune con l'esempio che abbiamo proprio davanti al naso: la natura variabile nel tempo e discontinua dell'occupazione umana nelle isole del Pacifico meridionale. Sia nel caso terrestre sia in quello extraterrestre entrano in gioco fattori di base universali, dalla scarsità di luoghi ideali in cui gettare l'ancora al tempo necessario a una popolazione per prepararsi a riprendere il viaggio nel vuoto.

Quadro realistico per specie in movimento

Nel 2015, con il mio collega Adam Frank dell'Università di Rochester, ero a pranzo vicino al campus della Columbia University a New York. Come al pranzo di Fermi 65 anni prima, la conversazione riguardava la natura delle specie che viaggiano nello spazio. E ispirati dal calcolo improvvisato di Fermi cercavamo di creare una strategia di indagine che riducesse il più possibile i presupposti infondati e potesse in qualche modo essere verificata o vincolata con dati effettivi. Alla base di questo esercizio c'era la semplice idea che, proprio come con gli occupanti transitori dell'isola di Pitcairn, in tutta la galassia possano verificarsi periodicamente ondate di esplorazione o insediamento, e che agli esseri umani sia capitato di comparire in un periodo di solitudine.

Questa idea si collega al fatto A originale di Hart: che oggi sulla

Soli nella folla

Tra tutte le possibili spiegazioni del perché non abbiamo visto altre civiltà cosmiche nella Via Lattea, forse la più plausibile è che esistono, ma non si trovano dalle nostre parti. Questa situazione potrebbe verificarsi se l'esplorazione e la migrazione interstellari sono discontinue e avvengono a ondate, in cui periodicamente le civiltà itineranti nello spazio si espandono per occupare i sistemi planetari più vicini e preziosi. Calcolando i movimenti stellari e una durata finita per ciascuna civiltà, le simulazioni di questo processo producono ammassi di sistemi occupati in modo continuato, oltre a regioni isolate e poco popolate, una delle quali potrebbe ospitare il nostro mondo solitario.

Diaspore galattiche

Un'istantanea di una simulazione illustra 10 milioni di anni di esplorazione interstellare per 10.000 sistemi abitabili all'interno di un riquadro con i lati lunghi circa 464 anni luce. (I sistemi inadatti agli insediamenti sono 22 volte più numerosi di quelli abitabili, ma qui non sono mostrati.) Su questa scala le stelle si muovono come particelle di un gas, impedendo o favorendo i viaggi interstellari attraverso le rispettive traiettorie tra l'una e l'altra. Le sonde provenienti da civiltà sparse in questo spazio virtuale si muovono a 3000 chilometri al secondo: 100 volte più veloci rispetto alla media delle stelle circostanti, che seguono una distribuzione della densità simile a quella della nostra regione di galassia.

Ogni punto rappresenta la posizione attuale di un sistema planetario, abitato o abitabile.

Alla fine della simulazione (*rappresentata qui*), 6948 dei sistemi analizzati erano stati visitati da una sonda, ma solo 403 ospitavano insediamenti attivi; 3052 sistemi abitabili non avevano ricevuto visite. Così si sono generati 11 diversi «imperi» interstellari composti da almeno dieci sistemi occupati, ciascuno segnalato da un colore diverso per indicare l'origine comune.

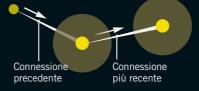
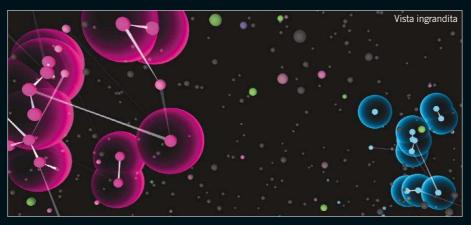
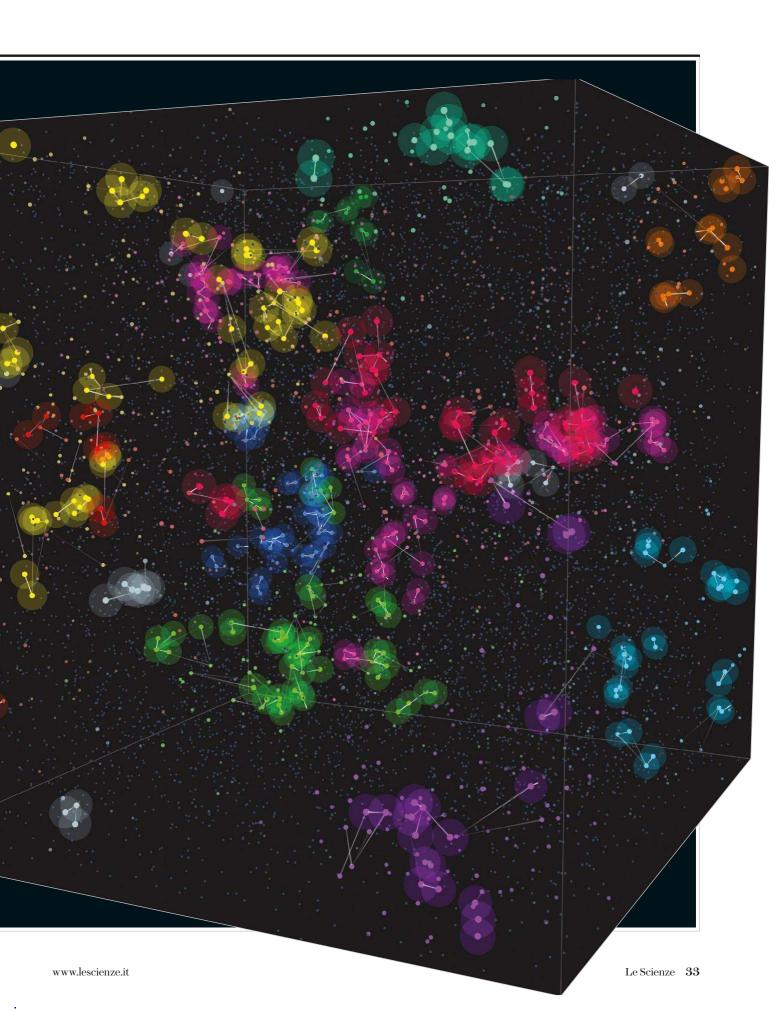
Le ulteriori ondate di insediamento che hanno occupato meno sistemi sono rappresentate in grigio.

I colori sbiaditi indicano i sistemi che non ospitano più insediamenti attivi: quelli attualmente attivi sono circondati da bolle semitrasparenti con un raggio di 10 anni luce, per indicare l'ipotetica sfera di influenza di un singolo sistema.

Nessun insediamento attivo nell'ultimo milione di anni — Insediamento crollato 0,5 milioni di anni fa — Insediamento attualmente attivo — Dieci anni luce

Dov'è la Terra?

Questa simulazione è una forte approssimazione della nostra zona nella galassia. Il sistema solare potrebbe essere situato in una qualsiasi parte disabitata del riquadro. Generati da fluttuazioni statistiche nelle traiettorie e nelle architetture planetarie delle stelle circostanti, questi «vuoti» transitori sono regioni in cui i mondi abitabili si troverebbero fuori dalla portata delle civiltà circostanti.

Gli agenti hanno puntato solo i sistemi entro un raggio di 10 anni luce che fossero abitabili, attualmente disabitati e non considerati da un altro agente. Le linee indicano viaggi interstellari riusciti e collegano sistemi colonizzati di recente con i loro genitori: le linee non illustrano il percorso effettivo eseguito, le posizioni relative dei sistemi sono in continuo mutamento, che qui è stato fissato alla fine della simulazione.

Fonte: Jonathan Carroll-Nellenback, Università di Rochester

Terra non ci siano prove di esploratori extraterrestri. Ma va oltre, chiedendo se si possano ottenere limiti significativi alla vita galattica ponendo vincoli all'arco di tempo preciso in cui la Terra potrebbe non avere ricevuto visite. Forse, moltissimo tempo fa, degli alieni arrivarono per poi andarsene. Nel corso degli anni, vari scienziati hanno discusso la possibilità di cercare manufatti che possano essere rimasti dopo queste visite al nostro sistema solare. Una ricerca completa dovrebbe avere proporzioni difficili da prevedere, ma restringendola alla Terra diventa un po' più facile da gestire. Nel 2018 un altro mio collega, Gavin Schmidt del Goddard Institute for Space Studies della NASA, insieme con Adam Frank ha realizzato una valutazione critica della possibilità di stabilire se sul nostro pianeta sia esistita una precedente civiltà industriale.

Per quanto fantasioso possa sembrare, Schmidt e Frank – come la maggior parte dei planetologi – sostengono che in realtà per il tempo è molto facile cancellare praticamente tutte le tracce di vita tecnologica sulla Terra. Dopo un milione di anni o più, le uniche prove si ridurrebbero ad anomalie stratigrafiche di tipo isotopico o chimico: stranezze come molecole sintetiche, plastiche o *fallout* radioattivo. Resti fossili e altri indicatori paleontologici sono così rari e dipendenti da circostanze speciali per la loro formazione che in questo caso non avrebbero molto da dirci. In effetti l'urbanizzazione umana moderna copre solo una quota nell'ordine dell'1 per cento della superficie terrestre: un'area di indagine molto piccola per eventuali paleontologi di un lontano futuro. Schmidt e Frank deducono inoltre che nessuno ha ancora effettuato gli esperimenti necessari a una ricerca completa di queste tracce non naturali sulla Terra. La conclusione è: se qualche milione di anni fa fosse esistita una civiltà industriale paragonabile alla nostra, forse non lo sapremmo. Questo non significa certo che ne sia esistita una, ma solo che l'eventualità non si può escludere in modo categorico.

In altri punti della galassia potrebbero esserci arcipelaghi di specie interstellari abituate ai visitatori cosmici

Nel corso degli ultimi anni abbiamo indagato le conseguenze di queste idee a livello più alto, su scala galattica, in un'indagine diretta da Jonathan Carroll-Nellenback, dell'Università di Rochester, e con Jason Wright, della Pennsylvania State University. Si è ottenuto un progresso fondamentale con lo sviluppo di una serie di simulazioni computerizzate basate su agenti, sostenute da una matematica vecchio stampo con carta e penna, che ci hanno permesso di realizzare un quadro più realistico di come potrebbero muoversi le specie in una galassia a sua volta piena di movimento.

Uno scenario semplice e sofisticato

Se fate un'istantanea delle stelle nel raggio di circa 200 anni luce dal Sole, vedrete che si stanno muovendo come le particelle di un gas. In relazione a qualsiasi punto fisso in questo spazio, una stella può muoversi velocemente o lentamente, in una direzione che in pratica è casuale. Allargate l'inquadratura, nell'ordine delle migliaia di anni luce, e comincerete ad accorgervi del grandioso movimento orbitale condiviso che porta una stella come il nostro Sole intorno alla Via Lattea una volta ogni 230 milioni di anni circa. Le stelle molto più vicine al centro della galassia completano un giro in un tempo nettamente minore, e ci sono stelle di un «alone» in movimento rapido che entrano ed escono dal piano del disco galattico all'interno di uno sciame distinto, grosso modo sferico, che circonda quel disco.

Questo significa che, se una civiltà si sta guardando intorno cercando stelle da esplorare, quello che le è più vicino adesso è molto diverso da quello che lo sarà in futuro. Un buon esempio di questo concetto è il nostro sistema solare. Attualmente la stella più vicina a noi, Proxima Centauri, si trova a 4,24 anni luce, ma tra circa 10.000 anni questa distanza si ridurrà a soli 3,5 anni luce: un risparmio notevole di tempo in un viaggio interstellare. Se da oggi aspettassimo circa 37.000 anni, la stella più vicina sarebbe per un certo tempo Ross 248, una nana rossa che in quel momento disterebbe da noi solo tre anni luce.

Per creare un modello di questa mappa stellare in movimento la nostra simulazione si basa su un riquadro tridimensionale di stelle, con movimenti simili a quelli che avvengono in una piccola parte di una galassia vera e propria. Quindi dà il via a un «fronte» di insediamento considerando alcune di queste stelle come ospiti per civiltà itineranti. Quelle civiltà hanno un ciclo di vita limitato, quindi un sistema può anche ritrovarsi senza più occupanti. E una civiltà deve aspettare un certo periodo prima di essere in grado di lanciare una sonda o intraprendere un viaggio verso la stella più vicina. Tutti questi fattori si possono modificare, regolare e indagare per vedere come influenzano il risultato. Per un'ampia gamma di possibilità, nello spazio interstellare si propaga da sé un fronte di insediamento dall'aspetto piuttosto frastagliato. La velocità di propagazione di questo fronte è essenziale per verificare e confermare le possibili soluzioni al dilemma originale di Fermi.

Quello che si scopre è al tempo stesso semplice e sofisticato. Innanzitutto, il movimento naturale delle stelle nella galassia, simile a quello di un gas, significa che perfino le sonde interstellari più lente, che viaggiano a circa 30 chilometri al secondo (quasi il doppio dei 17 chilometri al secondo a cui attualmente Voyager 1 si allontana dal Sole), permetterebbero a un fronte di insediamento di attraversare la galassia in molto meno di un miliardo di anni. Se consideriamo anche altri movimenti stellari, dalla rotazione galattica alle stelle dell'alone, questo periodo di tempo non fa altro che abbreviarsi. In altre parole, proprio come pensava Fermi, non è difficile riempire di vita la galassia. Ma è anche vero che il «riempimento» preciso della galassia dipende sia dal numero di mondi effettivamente colonizzabili esistenti – quello che abbiamo chiamato effetto Aurora, in omaggio ad *Aurora* di Kim Stanley Robinson, epico romanzo di fantascienza del 2015 – sia da quanto tempo le civiltà riescono a trascorrere su un mondo.

A un estremo, è facile svuotare la galassia non facendo altro che limitare il numero di pianeti utilizzabili e ipotizzando che le civiltà durino solo, per esempio, intorno a 100.000 anni. All'altro estremo, è facile regolare questi fattori in modo da riempire lo spazio di insediamenti attivi itineranti. In realtà, se i mondi idonei sono abbastanza numerosi, la durata media delle civiltà insediate è quasi ininfluente. Se mantengono la tecnologia che ha permesso loro di viaggiare, ce n'è un numero sufficiente per poter continuare l'esplorazione fino a riempire la galassia.

Ma è tra questi estremi che compaiono le situazioni più avvincenti e potenzialmente realistiche. Quando la frequenza dei mondi abitabili in una galassia è a metà tra alta e molto bassa, può succedere qualcosa di affascinante. In particolare, le normali fluttuazioni statistiche di numero e posizione dei mondi idonei nel-

Nella Via Lattea. La stella brillante sulla destra è Beta Centauri, a 352 anni luce da noi. Alla sua sinistra, Alpha Centauri, a 4,367 anni luce dalla Terra.

le regioni di spazio galattico possono generare ammassi di sistemi che sono continuamente visitati o ricolonizzati da ondate successive di esploratori interstellari. Immaginatelo come un arcipelago, un gruppo o una catena di isole. Il rovescio della medaglia è che in genere questi ammassi sono circondati da grandi regioni di spazio non occupate, luoghi troppo lontani e vuoti perché valga la pena di raggiungerli.

Il paradosso del paradosso

Questo scenario di un «arcipelago galattico» può spiegare la nostra situazione sulla Terra? Stranamente sì. Per esempio, se le tipiche civiltà planetarie possono durare un milione di anni e se solo il 3 per cento dei sistemi stellari sono effettivamente colonizzabili, c'è una probabilità intorno al 10 per cento che un pianeta come la Terra non abbia ricevuto visite almeno nell'ultimo milione di anni. In altre parole, non è poi così improbabile che ci troviamo nella parte solitaria dell'equazione.

Al contrario, questo scenario comporta che altrove nella galassia esistano ammassi, arcipelaghi, di specie interstellari per le quali è all'ordine del giorno avere vicini o visitatori cosmici. Affinché avvenga tutto questo non c'è bisogno di ipotesi estreme: basterebbero calcoli piuttosto normali con numeri planetari e la natura dei movimenti stellari in mezzo agli astri che vorticano nella Via Lattea. E anche se persistono molti dubbi sulla fattibilità di un qualsiasi tipo di viaggi interstellari e sulla probabilità che una specie li intraprenda effettivamente, altri fattori sono solo parametri da regolare. Alcuni, come il numero di mondi abitabili, cominciano a essere alla portata degli astronomi, via via che cerchiamo di conoscere meglio gli esopianeti. Altri, come la longevità delle civiltà, sono oggetto di analisi approfondite mentre cerchiamo di affrontare le nostre questioni di sostenibilità planetaria.

C'è anche la possibilità di scoprire le prove di arcipelaghi stellari colonizzati oppure la propagazione continua di un fronte di insediamento. Una nuova strategia interessante potrebbe essere cercare intelligenza e tecnologia extraterrestri puntando non tanto su singoli esopianeti conosciuti, quanto su regioni galattiche in cui la topografia delle stelle potrebbe prestarsi all'espansione interstellare o alla formazione di ammassi. Fino a poco tempo fa la nostra mappa tridimensionale dello spazio galattico era tristemente limitata, ma con strumenti come l'osservatorio Gaia dell'Agenzia spaziale europea, che mappa un miliardo di oggetti astronomici e movimenti stellari, potremmo riuscire a delineare questi punti caldi.

Ma alla fine nel paradosso di Fermi il vero paradosso potrebbe essere il fatto che non ci sia alcun paradosso. Il lavoro dei miei colleghi dimostra che per un pianeta abitabile e abitato come la Terra è naturale non manifestare prove visibili di visite o colonizzazioni passate da parte di una specie extraterrestre. E questo è vero sia se la galassia è priva di altre forme di vita avanzate tecnologicamente sia se è affollata di esploratori interstellari. Proprio come Pitcairn, che potrebbe essere rimasta disabitata nell'Oceano Pacifico per tre secoli, può darsi che la Terra stia solo attraversando un periodo di isolamento prima di essere nuovamente sommersa da un'ondata cosmica di vita pan-galattica.

Ma, come nel caso dei colonizzatori polinesiani nel corso dei secoli, la vera domanda è se quando questo accadrà la nostra civiltà planetaria esisterà ancora. ■

PER APPROFONDIRE

Interstellar Migration and the Human Experience. Finney B.R. e Jones E.M. (*a cura*), University of California Press, 1985.

The Great Silence: Science and Philosophy of Fermi's Paradox. Ćirković M.M, Oxford University Press, 2018.

The Fermi Paradox and the Aurora Effect: Exo-civilization Settlement, Expansion, and Steady States. Carroll-Nellenback J. e altri, in «The Astronomical Journal», Vol. 158, n. 3, articolo n. 117, settembre 2019.

If There Are Aliens Out There, Where Are They? Livio M. e Silk J., ScientificAmerican.com, 6 gennaio 2016.

Soli nella via Lattea. Gribbin J., in «Le Scienze» n. 603, novembre 2018.

Alan Dyer/VWPics/SPL/AGF

AMBIENTE

Venezia affonda

Acqua alta, abbassamento del suolo e riscaldamento globale incombono sul futuro della città lagunare

di Marco Anzidei, Antonio Vecchio e Fabio Florindo

Piazza San Marco durante l'evento eccezionale di acqua alta del 12 novembre 2019. Si tratta della seconda marea più alta mai registrata dopo quella del 1966.

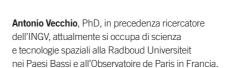
IN BREVE

Le popolazioni di aree costiere di tutto il mondo sono a rischio a causa dell'innalzamento del livello dei mari dovuto al riscaldamento globale. In alcune di queste aree, come Venezia, il rischio è addirittura più grave per fenomeni di subsidenza, ovvero lenti abbassamenti della superficie terrestre dovuti a cause naturali o antropiche.

Gli autori hanno sviluppato un modello per stimare l'aumento medio del mare nella città lagunare dovuto all'effetto combinato del cambiamento climatico e della subsidenza, e hanno usato dati storici e previsioni pubblicate dall'Intergovernmental Panel on Climate Change.

I risultati hanno mostrato che entro il 2100, in assenza di interventi sulle emissioni di gas serra che causano il riscaldamento globale, il livello medio del mare in laguna potrebbe aumentare fino a 82 centimetri rispetto al livello del 2005. In condizioni del genere, maree eccezionali come quella di novembre 2019, allagherebbero quasi il 100 per cento della città.

Marco Anzidei, PhD, è primo ricercatore dell’Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV). Si occupa di geodesia e variazioni di livello marino. È coordinatore dei progetti SAVEMEDCOASTS e SAVEMEDCOASTS-2, finanziati dall’Unione Europea.

Antonio Vecchio, PhD, in precedenza ricercatore dell’INGV, attualmente si occupa di scienza e tecnologie spaziali alla Radboud Universiteit nei Paesi Bassi e all’Observatoire de Paris in Francia.

Fabio Florindo, PhD, è dirigente di ricerca dell’INGV e si occupa di paleoclima. Ha effettuato sette spedizioni scientifiche in Antartide ed è stato il coordinatore del progetto ANtarctic geological DRILLing (ANDRILL).

L’eccezionale evento di acqua alta che ha colpito Venezia lo scorso mese di novembre è tra i maggiori mai registrati dall’Unità d’Italia a oggi. Le immagini dell’allagamento della Basilica di San Marco, evento avvenuto solo cinque altre volte nella storia più che millenaria della città lagunare, hanno fatto il giro del mondo. Questi eventi ripropongono prepotentemente ancora una volta il tema dei cambiamenti climatici e come questi cambiamenti influiscano sull’aumento del livello marino, con conseguenti impatti sulle attività umane, l’ambiente e il patrimonio culturale costiero.

Di quanto salirà il livello del mare e quali saranno gli effetti sulle coste nel 2100, che arriverà tra solo ottant’anni? Per rispondere a questa domanda si deve considerare che la Terra è un sistema complesso dove coesistono relazioni causa-effetto ben precise tra clima, temperature, livello marino e movimenti verticali della crosta terrestre.

Oltre il 70 per cento della Terra è coperto dagli oceani, che nel corso degli ultimi milioni di anni si sono ritirati ed espansi ciclicamente in risposta all’alternarsi di fasi climatiche fredde e calde. Durante queste oscillazioni, avvenute con periodi di decine di migliaia di anni, la geografia delle coste di tutti i continenti è cambiata continuamente. Negli ultimi 18.000 anni circa, dopo la fine dell’ultimo massimo glaciale, il livello medio globale del mare è salito rapidamente di circa 120 metri, formando isole e aumentando le distanze tra i continenti. I nostri antenati sono stati spettatori inermi di questo processo lento e inarrestabile.

Siti archeologici sommersi di età neolitica, greca, romana e medievale costituiscono la prova dei cambiamenti avvenuti negli ultimi 4000 anni. In epoca moderna, misurazioni del livello marino effettuate con mareografi e satelliti radar altimetrici mostrano che il mare ha iniziato a risalire dalla metà del XIX secolo. Soltanto nel XX secolo è salito di circa 14-17 centimetri e oggi il ritmo di crescita è in accelerazione: siamo già a oltre 30 centimetri per secolo (tra 3,2 e 3,4 millimetri all’anno). Nel Mediterraneo, bacino quasi chiuso con le sole aperture con gli oceani dello stretto di Gibilterra a ovest e del Canale di Suez a est, si registra una crescita più contenuta, di circa 20 centimetri per secolo (circa 2 millimetri all’anno). Questo a causa della maggiore densità delle sue acque (sono più saline) e dell’evapotraspirazione che ne rallenta l’aumento (le acque del Mediterraneo sono più calde di quelle oceaniche).

Perché varia il livello dei mari? Il principale responsabile è la variabilità della temperatura media del pianeta, che causa la fusione o l’accrescimento dei ghiacci polari – nel primo caso la massa d’acqua oceanica aumenta, nel secondo diminuisce – insieme alla contrazione o all’espansione termica degli oceani: se la temperatura media scende, la massa d’acqua globale si contrae e il suo volume totale diminuisce; se invece la temperatura aumenta, la massa d’acqua si espande e il suo volume cresce. In questo contesto hanno un ruolo importante i ghiacci di Groenlandia e Antartide, la cui fusione (lo scioglimento totale comporterebbe un aumento del livello del mare di 66 metri) o accrescimento possono avere serie conseguenze sulle variazioni del livello del mare a scala globale.

Attualmente la temperatura media della Terra è di circa 15 gradi Celsius. Durante l’ultimo massimo glaciale, tra 21.000 e 18.000 anni fa, la temperatura media era di circa 9 gradi Celsius e il mare era più basso di 120 metri (*si veda il box nella pagina a fronte*). Circa 3 milioni di anni fa, durante il Pliocene, la temperatura media era più alta di 3-4 gradi e il mare era 20-30 metri più alto di oggi mentre nell’Eocene, 40 milioni di anni fa, la temperatura era di circa 19 gradi più alta e il livello marino era circa 70 metri più alto. È evidente la stretta relazione tra temperatura media globale e livello marino.

La situazione attuale

Oggi si sta verificando una forte accelerazione del riscaldamento globale in corrispondenza di un aumento della concentrazione di anidride carbonica (CO_2) in atmosfera che ha raggiunto livelli mai così alti negli ultimi 3 milioni di anni. Stiamo procedendo oltre le 410 parti per milione (ppm), valori simili a quelli del Pliocene, quando il livello marino era circa 20 metri più alto di oggi. Sebbene sia un gas serra naturalmente presente nell’atmosfera terrestre e capace di generare un surriscaldamento della Terra, la CO_2 è in forte aumento a partire dal 1870-1880. In quel periodo eravamo all’inizio della seconda rivoluzione industriale, corrispondente all’introduzione dell’elettricità, dei prodotti chimici e del petrolio e a un maggior impiego di carbone fossile. Dati sui livelli dei mari (o mareografici), incrociati con studi su insediamenti archeologici sommersi, hanno evidenziato che l’attuale accelerazione della crescita del livello marino è iniziata proprio 100 anni fa circa.

Le montagne russe del mare

Se si escludono le lente variazioni morfologiche dei bacini oceanici, dovute ai movimenti delle placche tettoniche, le oscillazioni del livello dei mari nel corso della storia più recente della Terra sono state indotte principalmente da cause climatiche.

Durante le ere glaciali, un grande volume di acqua è stato immagazzinato nelle calotte glaciali dell'Artide e dell'Antartide e nei ghiacciai continentali, con la conseguente riduzione del livello degli oceani. In questi intervalli, le coltri glaciali si estendevano dalle isole britanniche all'intera Scandinavia, alla Russia, compresa la metà occidentale della Siberia settentrionale, coprivano il Canada e parte degli Stati Uniti. Durante i periodi interglaciali invece, ghiacciai e calotte di ghiaccio ridussero il proprio volume e vaste masse d'acqua tornarono negli oceani con la conseguente risalita, anche molto veloce, del livello dei mari.

Grazie all'analisi dei solchi di battente sulle coste calcaree, incrostazioni su speleotemi (stalattiti e stalagmiti) in grotte sommerse, analisi di coralli fossili e isotopi dell'ossigeno su foraminiferi marini (microrganismi unicellulari con guscio carbonatico), è stato possibile ricostruire con una buona accuratezza la curva di oscillazione del livello marino nel corso degli ultimi 500.000 anni. Da allora anche la temperatura media annua della Terra è oscillata nel tempo, descrivendo cinque cicli glaciali-interglaciali a cui sono corrisposte fluttuazioni del livello degli oceani di oltre 100 metri (*grafico in basso*).

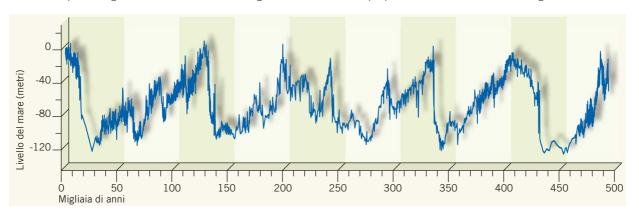
L'ultima fase interglaciale, compresa tra 129.000 e 116.000 anni fa, fu particolarmente calda, e provocò un aumento del livello degli oceani di 6-9 metri superiore all'attuale. Questo periodo interglaciale rappresenta un riferimento importante per la validazione dei modelli climatologici globali con cui si cercano di formulare previsioni sul riscaldamento globale e il conseguente aumento del livello del mare. A partire da 116.000 anni fa, con un andamento interrotto da diverse fluttuazioni, si giunse all'ultima era glaciale, culminata tra 21.000 e 18.000 anni fa. Durante questo intervallo il livello medio degli oceani scese progressivamente di oltre 120 metri per poi risalire velocemente fino ai nostri giorni.

Variazioni del livello marino negli ultimi 500.000 anni, attraverso gli ultimi cinque cicli glaciali, caratterizzati da fluttuazioni degli oceani di oltre 100 metri. Nei periodi caldi il mare è più alto a causa dello scioglimento dei ghiacci polari e dell'espansione termica della massa d'acqua. Si noti che nell'ultimo interglaciale, tra 129.000 e 116.000 anni fa, il livello degli oceani era 6-9 metri più alto dell'attuale.

Illustrazione di Danilo Sossi su indicazione degli autori

L'accordo di Parigi del dicembre 2015 sulla riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera e sul contenimento dell'aumento di temperatura media globale al di sotto di 1,5 gradi rispetto al periodo preindustriale costituisce l'ultima speranza per tentare di contenere l'aumento del livello marino nei prossimi anni. Ma, di fatto, questo accordo si basa su azioni non vincolanti. E già alcuni firmatari, come gli Stati Uniti, hanno annunciato di volerne uscire, ponendo una pesante ipoteca sulla sua efficacia.

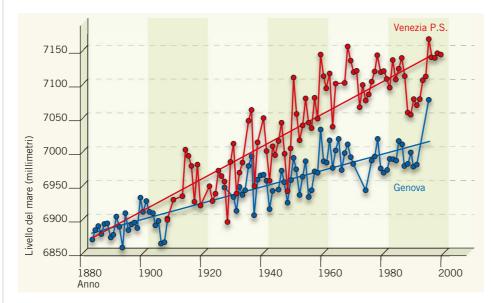
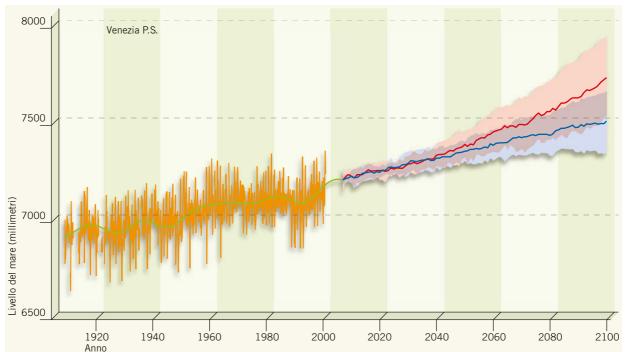
Se le emissioni non verranno ridotte e l'andamento climatico attuale continuerà così nei prossimi anni, quali scenari ci possiamo aspettare? L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), indica un aumento massimo del livello marino tra 52 e 98 centimetri nel 2100, il che rappresenta un fattore di rischio per molte popolazioni costiere del mondo.

Tuttavia, alcune ricerche ritengono che questa proiezione sia troppo conservativa e che il mare potrebbe salire oltre questo limite, con un aumento compreso tra 62 centimetri e oltre due metri nel 2100, proprio grazie al contributo della fusione dei ghiacci della Groenlandia, che si ridurrebbero rapidamente se la temperatura globale aumentasse fino a 5 gradi. Si stima che se non verranno ridotte le emissioni di gas serra, il livello del mare potrebbe continuare a salire oltre il 2100, raggiungendo alcuni metri nel 2300 e ancora di più su tempi più lunghi. Se invece le emissioni verranno limitate, gli effetti potrebbero ridursi, sebbene il livello del mare continuerebbe a salire ugualmente per molti secoli.

Quindi, gli studi si stanno concentrando non solo sulle cause ma anche sugli effetti di questo aumento sulle coste di tutto il mondo, realizzando proiezioni di livello marino per i prossimi decenni e per differenti scenari climatici attesi. I decisori politici iniziano a interessarsi a queste ricerche per individuare fin da ora i più efficaci interventi di protezione e di adattamento, come la realizzazione di barriere costiere o addirittura lo spostamento di insediamenti verso le zone interne. In particolare in aree costiere densamente popolate e di alto valore culturale e ambientale, dove si stanno verificando disagi sociali, perdite economiche e ambientali.

Così sta avvenendo in laguna veneta, dove nel computo delle proiezioni per la valutazione degli impatti si deve includere la subsidenza. Questo fenomeno, che è un lento movimento verso il basso della superficie terrestre che può avvenire in determinate zone per cause naturali (per esempio tettonica o vulcanismo) o antropi-

Un futuro sott'acqua?

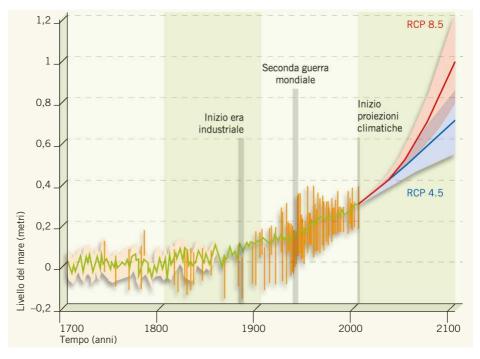
L'aumento del livello medio del mare dovuto al riscaldamento globale sta mettendo a rischio le aree costiere. In alcuni casi questo rischio è addirittura più elevato a causa di fenomeni di subsidenza: lenti movimenti verso il basso della superficie terrestre nelle aree interessate. Un esempio è Venezia, come mostra un confronto con Genova (*qui sotto*). Per cercare di capire che cosa accadrà in futuro alla città lagunare gli autori hanno sviluppato un modello per stimare l'aumento del livello medio del mare dovuto sia al riscaldamento globale sia alla subsidenza (*in basso*).

Registrazioni mareografiche nelle stazioni di Genova e Venezia Punta della Salute. I grafici evidenziano la maggiore tendenza di aumento di livello marino a Venezia (2,5 millimetri all'anno dal 1909 a oggi) rispetto a Genova (1,2 millimetri all'anno a partire dal 1884), a causa della subsidenza (le regressioni lineari sui dati, che rappresentano l'andamento medio del livello marino, sono indicate dalle rette in figura).

Proiezioni del livello del mare fino al 2100 per la stazione Venezia Punta della Salute che includono il contributo dei trend di livello marino nel caso dei due scenari RCP2.6 (*blu*), il più ottimistico, e RCP8.5 (*rosso*), il più critico, elaborati dall'IPCC e dei i movimenti verticali del suolo. Le bande di colore rappresentano l'intervallo di confidenza del 90 per cento, ottenuto includendo le incertezze sui trend IPCC e sulle misurazioni di movimenti verticali. La curva verde rappresenta il livello del mare misurato; la curva arancione spessa indica un filtro dei dati e un'estrapolazione fino al 2007 nel modello degli autori. In RCP8.5 si potrebbero verificare fino a 82 centimetri di aumento di livello marino rispetto al 2005, tra soli ottant'anni.

Illustrazioni di Danilo Sossi su indicazione degli autori

LE PREVISIONI DELL'IPCC

Scenari globali per il livello degli oceani

Prima del 1880, ovvero dell'inizio dell'era industriale, il livello medio marino globale era più o meno rimasto stabile. Solo in seguito inizia ad aumentare in modo accelerato, in particolare subito dopo la seconda guerra mondiale, periodo caratterizzato da un'intensa produzione industriale.
Entro il 2100 le proiezioni globali indicano un possibile aumento fino a circa 1 metro nello scenario climatico meno favorevole. Le bande colorate rappresentano le proiezioni dell'IPCC, con le relative incertezze, per le emissioni negli scenari RCP8.5, il più critico di quattro, e RCP4.5, il terzo in ordine decrescente di criticità.

Illustrazione di Danilo Sossi; da (modificato su indicazione degli autori) *Sea level change*, di Church J.A., Nunn, P. e altri, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013

che (per esempio estrazione di fluidi dal sottosuolo), ha per effetto l'accelerazione dell'aumento del livello marino locale, anche con valori superiori di quello indotto dal riscaldamento globale. Oltre a Venezia, anche altre grandi città costiere – come Tokyo, New York, Singapore e Miami – soffrono di questi effetti combinati.

Gli impatti attesi sulle coste

È possibile prevedere quali saranno gli scenari possibili nel 2100 sulle coste e quali impatti potranno avere? Tramite studi multidisciplinari che coinvolgono le scienze della Terra e del clima, insieme a tecniche di rappresentazione realistiche basate su dati territoriali ad alta risoluzione, si può tentare di rispondere a queste domande. Poiché la variazione del livello marino in un punto della costa dipende da eustatismo (variazione del volume di acqua degli oceani) e movimenti verticali del suolo (questi ultimi causati da movimenti geologici oltre a eventuale subsidenza causata dall'estrazione di fluidi dal sottosuolo), grazie a misurazioni satellitari geodetiche (ovvero di forma e dimensione della Terra) e dati geologici che valutano il contributo dei movimenti verticali e grazie alla disponibilità di modelli digitali ad alta risoluzione della topografia costiera diventa possibile realizzare scenari di aumento di livello marino per aree specifiche.

Nuovi studi indicano che Maldive, Singapore, Filippine, Myanmar, Vietnam, Florida e India saranno tra le zone maggiormente colpite dal fenomeno a causa della loro bassa elevazione sul mare. Nel Mediterraneo, il progetto europeo SAVEMEDCOASTS ha fornito un primo quadro sulle aree più esposte al rischio di allagamento marino nel 2100. Le zone in questione corrispondono a 163 principali pianure costiere poste a una quota entro 2 metri sopra il livello medio attuale del mare. L'area totale a rischio allagamento corrisponde a una superficie equivalente a circa 5,5 milioni di campi da calcio. Correggendo le proiezioni di aumento di livello marino (per esempio quelle previste dall'IPCC) con i valori dei movimenti verticali del suolo si possono calcolare e mappare le aree a potenziale rischio inondazione marina.

Poiché il Mediterraneo è anche una zona altamente sismica, in cui sono avvenuti importanti *tsunami* generati da forti terremoti, bisogna anche prevedere che gli scenari di inondazione marina subiranno amplificazioni locali in occasione di questi eventi in condizioni di mare più alto rispetto a oggi. Lo stesso accadrà in occasione delle ricorrenti tempeste meteorologiche estreme.

Queste mappe permettono di visualizzare quello che potrebbe accadere nel prossimo futuro in una zona. Usando indicatori specifici, si possono valutare i potenziali impatti socioeconomici per una data area. Queste valutazioni sono di grande interesse e utilità, e lo saranno sempre di più nei prossimi anni, per favorire una gestione consapevole della fascia costiera, la mitigazione dei rischi naturali e la sicurezza della vita umana. Per esempio, Singapore ha previsto investimenti per 400 miliardi di dollari di Singapore (un dollaro di Singapore equivale a circa 0,66 euro), di cui dieci per ricerca sull'aumento del livello marino indotto dal cambiamento climatico e il resto per sistemi di drenaggio per adeguare la rete fognaria e la resilienza alle alluvioni in condizioni di livello marino più alto, oltre ad altri investimenti per contrastare il fenomeno.

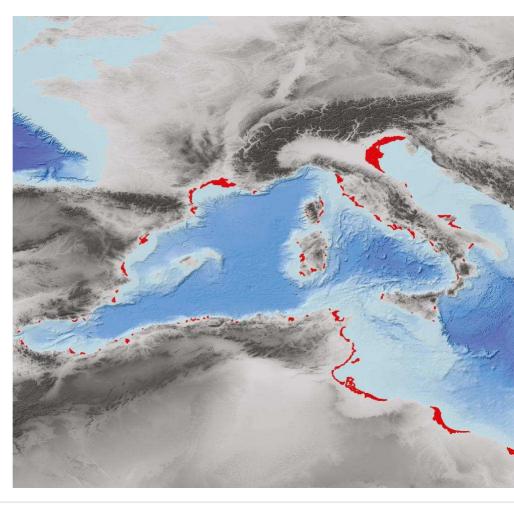
Ma se la temperatura dovesse aumentare fino a 5 gradi, il peggiore scenario possibile, il mare potrebbe arrivare a invadere una superficie grande quasi come la Libia, cioè circa 1,8 milioni di chilometri quadrati, mettendo a rischio oltre 200 milioni di persone che vivono lungo tutte le coste del pianeta. Una ricerca recente peggiora queste previsioni, evidenziando che sulla base delle tendenze attuali la fusione dei ghiacci della Groenlandia potrebbe causare da sola l'inondazione di territori con il coinvolgimento

UN PROGETTO EUROPEO

Salviamo le coste del Mediterraneo

Il progetto SAVEMEDCOASTS (acronimo da Sea Level Rise Scenarios along the Mediterranean coasts), cofinanziato dall'Unione Europea e coordinato dall'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia, ha messo in evidenza le aree costiere del Mediterraneo a maggiore rischio di inondazione a causa dell'aumento del livello marino atteso al 2100. In condizioni di mare più alto, saranno maggiori anche gli effetti di tsunami e tempeste con conseguenti disagi per le popolazioni costiere. A partire dal 2020 la seconda fase del progetto si occuperà di approfondire gli scenari nei maggiori delta fluviali del Mediterraneo. Queste aree, di alto valore ambientale ed economico, sono soggette a subsidenza naturale e antropica, quindi più vulnerabili all'aumento del livello dei mari.

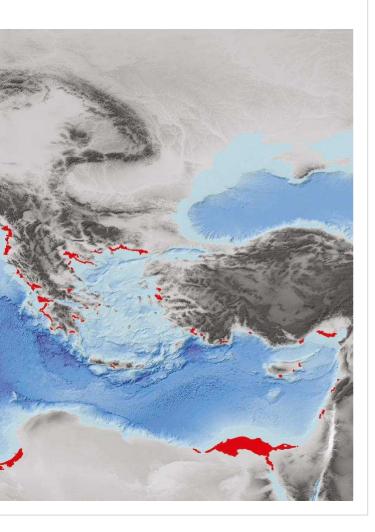
Le 163 piane costiere del Mediterraneo a rischio di allagamento marino (*in rosso*) evidenziate da SAVEMEDCOASTS. Sono aree poste entro la quota di 2 metri sul livello del mare e insieme hanno una superficie totale equivalente a circa 5,5 milioni di campi di calcio. La maggior parte potrebbe sparire nei prossimi 80 anni.

Cortesia SAVEMEDCOASTS

di circa altri 100 milioni di abitanti entro la fine del secolo. Quindi si potrebbero raggiungere oltre 300 milioni di persone in totale, considerando che per ogni centimetro di aumento del livello del mare globale, circa 6 milioni di persone in più si trovano esposte alle inondazioni.

Un caso emblematico

Il 12 novembre 2019, l'acqua alta che ha allagato Venezia ha raggiunto i 188 centimetri. Si tratta della seconda marea più alta mai registrata dopo quella del 1966, anno particolarmente piovoso che ci ricorda l'alluvione di Firenze del 4 novembre. L'allagamento della Basilica di San Marco, costruita nel IX secolo, ha solo cinque precedenti in tutta la sua storia. Quindi sei volte in 1200 anni, di cui tre si sono verificate negli ultimi vent'anni. Dopo quella dello scorso novembre, la più recente si era verificata il 30 ottobre 2018. Il dato registrato dalla stazione di Venezia Punta della Salute dall'8 al 20 novembre 2019 mostra un aumento del livello del mare talmente elevato nella notte tra il 12 e il 13 che la registrazione mareografica quasi raggiunge il limite misurabile dagli strumenti.

Se questo è lo stato attuale, quale scenario si può prospettare nel 2100 per questa città che tra il 1930 e il 1970 ha subito una forte subsidenza a causa dell'estrazione di fluidi dal sottosuolo? Uno studio da noi pubblicato nel 2019 su «Water» ha stimato che il livello medio del mare in laguna veneta potrebbe aumentare di 82 centimetri (con un'incertezza di 25 centimetri in più o in meno) rispetto al livello del 2005 a causa dell'effetto combinato di cambiamento climatico e subsidenza media di 3,3 millimetri all'anno (*si veda il box a p. 40*). Quest'ultima è stata calcolata con precise misurazioni geodetiche ottenute da dati GPS di stazioni in laguna. Con questo valore, molte zone sarebbero sempre allagate. Inoltre, in condizioni del genere, maree eccezionali come quella di 188 centimetri di novembre 2019 causerebbero aumenti temporanei del livello del mare fino a oltre 2,30 metri che porterebbero all'allagamento di quasi il 100 per cento di Venezia, con le conseguenze del caso.

Lo studio ha approfondito il contributo dei fattori locali, come la variabilità climatica naturale e i movimenti verticali della crosta terrestre, che possono influire sul livello del mare. In particolare, le analisi sono state effettuate per un gruppo di stazioni mareografiche del Mediterraneo poste nel nord dell'Adriatico e nel nord del Tirreno, presenti negli archivi globali del Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL), gestito dal National Oceanography Centre di Liverpool. Per queste stazioni sono disponibili serie storiche di misurazioni mareografiche che iniziano intorno al 1880, in corrispondenza dell'inizio dell'era industriale. Per ottenere le

proiezioni al 2100 nei siti considerati, i dati mareografici misurati (almeno 60 anni di dati acquisiti nel periodo 1888-2008) sono stati integrati con gli andamenti del livello marino attesi dai modelli IPCC e con misurazioni dirette degli andamenti dei movimenti verticali della crosta terrestre. I primi sono stati ottenuti valutando l'impatto sul livello del mare di due scenari di aumento di CO_2 in atmosfera sviluppati dall'IPCC (indicati rispettivamente con le sigle RCP2.6 e RCP8.5, il più ottimistico e il più critico).

I movimenti verticali della crosta terrestre causano variazioni di forma dei bacini e dell'altezza del suolo rispetto al livello del mare. Sebbene questo effetto non modifichi direttamente la quantità di acqua o le sue proprietà fisiche, esso provoca un aumento netto (in caso di subsidenza) o una diminuzione (in caso di sollevamento) del livello del mare locale, perché la costa si muove verticalmente. Se il movimento tettonico verticale agisce in modo costante nel tempo, questo si traduce localmente in un tasso netto sul livello del mare che si aggiunge al tasso indotto dall'aggiustamento post-glaciale (la superficie terrestre, liberata dal peso del ghiaccio, ritorna lentamente al proprio equilibrio), influenzando così la variazione locale del livello del mare.

Il tasso di variazione dovuto ai movimenti verticali è stato misurato con le reti regionali continue GPS che operano nella regione euromediterranea da oltre sette anni, in posizioni prossime alle stazioni mareografiche. Il *pattern* spaziale è variabile, ed è quasi nullo nel golfo di Trieste; minore di 1 millimetro all'anno nell'area del nord Tirreno e circa 1,5 millimetri all'anno a Dubrovnik, in Croazia, sulla costa orientale centrale del Mar Adriatico. Al contrario, le velocità misurate dal GPS in laguna veneta mostrano tassi di subsidenza significativi. La subsidenza media dell'area, calcolata usando 14 stazioni GPS, è –3,30 millimetri (con un'incertezza di 0,85 millimetri) all'anno. Parte della subsidenza rilevata è dovuta all'aggiustamento post-glaciale, stimato in questa regione tra –0,12 e –0,21 millimetri all'anno, mentre la parte rimanente può essere attribuibile a effetti naturali e antropogenici.

Per capire meglio la situazione di Venezia, può essere utile confrontare i dati archiviati dal PSMSL acquisiti, per esempio, alle stazioni mareografiche di Genova e Venezia Punta della Salute. La tendenza maggiormente crescente alla stazione di Venezia rispetto a quella di Genova, non affetta da rilevanti movimenti tettonici verticali, è causata principalmente dalla subsidenza della laguna.

Lo studio ha fornito le proiezioni al 2100 al mareografo di Venezia Punta della Salute ottenute dalla combinazione degli effetti dei *trend* di livello marino (nel caso dei due scenari IPCC), la variabilità naturale dovuta a effetti climatici locali, e i movimenti verticali del suolo. A Venezia Punta della Salute, i futuri livelli del mare sono dominati dalla subsidenza, che da sola causa oltre il 60 per cento di incremento di livello del mare al 2100. In RCP2.6 e RCP8.5, i livelli del mare previsti sono di 60,3 centimetri (con un'incertezza di 21,7 centimetri) e 82 centimetri (con un'incertezza di 26 centimetri) per il 2100. Questi valori superano di circa 38,5 centimetri i valori calcolati dall'IPCC proprio a causa della subsidenza di Venezia.

Oltre Venezia

Il livello marino ha sempre oscillato per cause naturali e continuerà a farlo anche in futuro. Tuttavia le emissioni di gas serra dovute alle attività umane a partire dagli ultimi due secoli circa stanno causando un aumento accelerato della temperatura globale che non ha precedenti nella storia della Terra. Questo aumento si riflette sull'aumento del livello dei mari in modo drammatico.

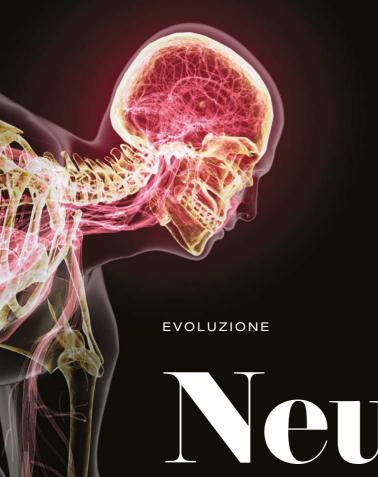
Stiamo già assistendo a migrazioni di popolazioni che si spostano verso le aree interne dei continenti e delle aree insulari, abbandonando piane costiere produttive che sono lentamente sommerse dal mare. Arcipelaghi di piccole isole come le Maldive rischiano di scomparire. In condizioni di mare più alto tsunami e tempeste avranno effetti amplificati e aumenteranno le condizioni di rischio. Proprio come accade oggi a Venezia, nei prossimi anni centinaia di milioni di persone che vivono lungo le coste del globo dovranno affrontare questi cambiamenti. Saremo preparati? ■

PER APPROFONDIRE

Understanding Sea-Level Rise and Variability. Church J.A., Woodworth P.L., T. Aarup T., Wilson W.S. (*a cura*), Blackwell Publishing, 2010.

Natural Variability and Vertical Land Motion Contributions in the Mediterranean Sea-Level Records over the Last Two Centuries and Projections for 2100. Vecchio A., Anzidei M., Serpelloni E. e Florindo F., in «Water», Vol. 11, n. 7, articolo 1480, 16 luglio 2019. **DOI:10.3390/w11071480.**

Sea level change. Church J.A., Nunn, P. e altri, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

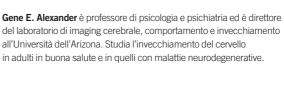
Illistrazione di Bryan Christie Design

EVOLUZIONE

Neuroni in forma

Mente e corpo sarebbero collegati grazie a cambiamenti chiave avvenuti durante l'evoluzione umana e ai quali ispirarsi per rallentare l'invecchiamento del cervello

di David A. Raichlen e Gene E. Alexander

David A. Raichlen è professore di scienze biologiche e direttore del laboratorio di biologia evoluzionistica dell'esercizio fisico alla University of Southern California. Le sue ricerche riguardano biomeccanica e fisiologia dell'esercizio in una prospettiva evolutiva.

Gene E. Alexander è professore di psicologia e psichiatria ed è direttore del laboratorio di imaging cerebrale, comportamento e invecchiamento all'Università dell'Arizona. Studia l'invecchiamento del cervello in adulti in buona salute e in quelli con malattie neurodegenerative.

Negli anni novanta è stata annunciata una serie di scoperte destinata a ribaltare un principio fondamentale delle neuroscienze. Per decenni si è creduto che il cervello maturo fosse incapace di formare nuovi neuroni; e che, una volta raggiunta l'età adulta, il nostro cervello cominciasse a perdere neuroni, invece di acquisirne. Eppure, aumentavano le prove del fatto che il cervello adulto poteva generare nuovi neuroni.

In un esperimento sensazionale sui topi, gli scienziati avevano scoperto che la semplice corsa su una ruota favoriva la nascita di nuovi neuroni nell'ippocampo, una struttura cerebrale associata con la memoria. Da allora, altri studi hanno stabilito che l'esercizio fisico ha effetti positivi anche sul cervello umano, specie nell'invecchiamento, e che addirittura potrebbe ridurre il rischio di morbo di Alzheimer e di altri disturbi neurodegenerativi. Queste ricerche hanno però sollevato una domanda essenziale: perché l'esercizio fisico influisce sul cervello?

L'attività fisica migliora la funzionalità di molti apparati del nostro corpo, ma in genere gli effetti sono associati a una migliore prestazione atletica. Per esempio, quando camminate o correte, i vostri muscoli richiedono una maggiore quantità di ossigeno, e nel tempo il vostro sistema cardiovascolare risponde aumentando le dimensioni del cuore e sviluppando nuovi vasi sanguigni. I cambiamenti cardiovascolari sono principalmente una risposta alle sfide che l'esercizio impone all'organismo, le quali possono aumentare la resistenza. Ma quale sfida suscita una risposta da parte del cervello?

Rispondere alla domanda ci induce a ripensare le nostre teorie sull'esercizio fisico. Spesso pensiamo che camminare o correre siano attività che il corpo esegue con il pilota automatico. Ma le ricerche condotte nell'ultimo decennio da noi e da altri ricercatori indicherebbero che questa convinzione comune sia errata. L'esercizio fisico sembra, piuttosto, un'attività insieme fisica e cognitiva. In effetti, questo legame tra attività fisica e salute del cervello potrebbe risalire a milioni di anni fa, all'origine dei tratti distintivi del genere umano. Se capiremo meglio come, e perché, l'esercizio fisico coinvolge il cervello, potremo forse usare a nostro vantaggio le corrispettive vie fisiologiche, e concepire così nuovi esercizi atti a potenziare le nostre capacità cognitive mentre invecchiamo. Un lavoro che abbiamo appena iniziato.

Flessioni per il cervello

Per capire perché l'esercizio fisico giova al cervello, dobbiamo considerare innanzitutto quali aspetti della struttura cerebrale e dei processi mentali sembrano più sensibili all'esercizio. Quando, negli anni novanta, ricercatori del Salk Institute for Biological Studies a La Jolla, in California, guidati da Fred Gage e da Henriette Van Praag, hanno dimostrato che correre aumenta la nascita di nuovi neuroni nell'ippocampo, hanno osservato anche che questo processo sembra legato alla produzione di una proteina, il fattore neurotrofico derivato dal cervello (BDNF). Il BDNF è prodotto in tutto il corpo e nel cervello, e promuove la proliferazione e la sopravvivenza dei neuroni neonati. Il gruppo del Salk e altri ricercatori sono andati oltre, e hanno dimostrato che nei roditori la neurogenesi indotta dall'esercizio fisico è associata con una migliore prestazione nei test di memoria. I risultati di questi studi sono stati clamorosi: l'atrofia dell'ippocampo è legata a problemi di memoria nel normale invecchiamento umano e avviene in misura maggiore nelle persone colpite da malattie neurodegenerative come l'Alzheimer. Le scoperte nei roditori hanno aperto uno squarcio sul possibile ruolo dell'esercizio fisico nel contrastare questo declino.

In seguito a questi studi sugli animali, i ricercatori hanno svolto una serie di indagini che hanno determinato che negli esseri umani, come nei roditori, l'esercizio aerobico favorisce la produzione

IN BREVE

È ormai indubbio che l'esercizio fisico ha effetti positivi sul cervello, specie nel corso dell'invecchiamento.

Meno chiare sono le ragioni per cui, innanzitutto, l'attività fisica influenza il cervello.

Eventi decisivi nella storia evolutiva degli esseri umani avrebbero formato il legame tra esercizio fisico e funzionalità cerebrale.

Un esercizio cognitivamente stimolante potrebbe giovare al cervello più di un'attività fisica meno impegnativa dal punto di vista cognitivo.

di BDNF e accresce la struttura, ossia dimensioni e connettività, di aree decisive del cervello, tra cui l'ippocampo. In un trial randomizzato condotto all'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign da Kirk Ercikson e Arthur Kramer, 12 mesi di esercizio aerobico avevano aumentato i livelli di BDNF, accresciuto le dimensioni dell'ippocampo e migliorato la memoria in volontari anziani.

Altri scienziati hanno scoperto associazioni tra esercizio fisico e ippocampo in studi basati su osservazioni. Nello studio che abbiamo effettuato in Regno Unito su oltre 7000 adulti, dalla mezza età a un'età anziana, pubblicato nel 2019 su «Brain Imaging and Behavior», abbiamo dimostrato che le persone che dedicavano più tempo a un'attività fisica, da moderata a energica, avevano un volume dell'ippocampo maggiore. Sebbene non sia ancora possibile affermare che negli esseri umani questi effetti siano correlati alla neurogenesi o ad altre forme di plasticità cerebrale, come un aumento delle connessioni tra i neuroni esistenti, i risultati indicano che l'esercizio fisico è utile all'ippocampo e alle sue funzioni cognitive.

Alcuni ricercatori hanno anche documentato chiari legami tra esercizio aerobico e benefici in altre parti del cervello: per esempio un'espansione della corteccia prefrontale, l'area situata appena dietro alla fronte. L'accrescimento di questa regione è stato collegato a funzioni cognitive esecutive più efficienti, che implicano aspetti di pianificazione, di presa di decisioni e di multitasking, tutte capacità che, come la memoria, tendono a diminuire nel normale invecchiamento e si deteriorano ulteriormente con l'Alzheimer. Gli scienziati ipotizzano che responsabile degli effetti benefici dell'esercizio sulla corteccia prefrontale e su altre regioni cerebrali sia, oltre all'ippocampo, un aumento delle connessioni tra i neuroni esistenti, più che la nascita di nuovi neuroni.

Alzati e attivati

Con l'accumularsi delle prove che l'esercizio aerobico migliora la salute del cervello, specialmente negli anziani, il passo successivo era capire quali sfide cognitive comporti l'attività fisica che innesca questa risposta adattativa. Abbiamo pensato che esaminare la relazione evolutiva tra cervello e corpo fosse un buon punto di partenza. Gli ominini (il gruppo che include esseri umani moderni e nostri parenti stretti estinti) si sono separati dalla linea che ha portato ai nostri parenti viventi più prossimi, scimpanzé e bonobo, 6 o 7 milioni di anni fa. In tutto questo tempo gli ominini hanno evoluto adattamenti anatomici e comportamentali che ci distinguono dagli altri primati. Pensiamo che due cambiamenti evolutivi, in particolare, colleghino esercizio fisico e funzionalità cerebrale, con modalità a cui possiamo ricorrere oggi.

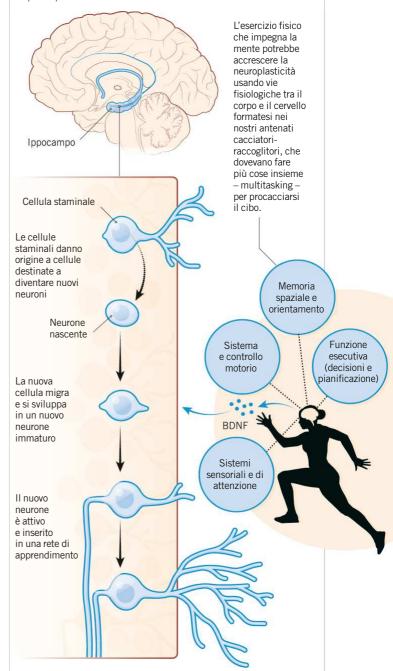
Come primo cambiamento, i nostri antenati passarono da un'andatura sui quattro arti a una postura eretta, sui soli arti posteriori. Questa postura bipede implica che in alcuni momenti il nostro corpo sia bilanciato precariamente su un solo piede, invece che su due o più arti, come in altre grandi scimmie. Per svolgere questo compito, il cervello deve coordinare una grande quantità di informazioni e, nel mentre, regolare l'attività muscolare in tutto il corpo per mantenere l'equilibrio. E, coordinando queste azioni, dobbiamo anche fare attenzione a eventuali ostacoli nell'ambiente. In altre parole, per il semplice fatto di essere bipedi il nostro cervello potrebbe essere messo cognitivamente più alla prova di quanto lo fosse quello dei nostri antenati quadrupedi.

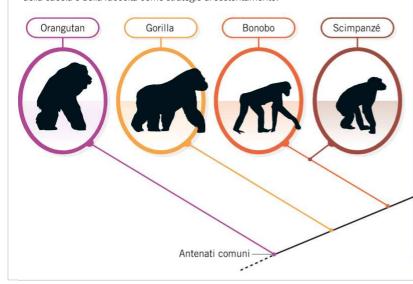
Come secondo cambiamento, lo stile di vita degli ominini cambiò per incorporare livelli superiori di attività aerobica. Le prove fossili indicano che, negli stadi primitivi dell'evoluzione umana, i nostri antenati erano probabilmente scimmie antropomorfe bipe-

DAL CORPO ALLA MENTE

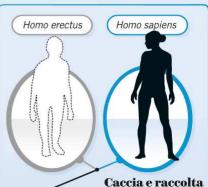
Nuovi neuroni nel cervello che invecchia

L'esercizio fisico porta cambiamenti benefici nel cervello adulto, come la nascita di nuovi neuroni e un aumento delle connessioni tra i neuroni esistenti. Un modo in cui l'attività fisica indurrebbe questa neuroplasticità è aumentando la produzione del fattore neurotrofico derivato dal cervello (BDNF), una proteina che favorisce la proliferazione e la sopravvivenza dei neuroni. Secondo ricerche recenti, impegnare cognitivamente il cervello durante l'attività fisica rafforza questo processo.

Illustrazioni di Tami Tolpa

Alzati e datti una mossa!

Nei 6-7 milioni di anni trascorsi da quando la linea evolutiva umana si è separata da quella degli scimpanzé e dei bonobo, il nostro genere ha evoluto diverse caratteristiche che ci hanno distinti dalle altre grandi scimmie. Gli effetti benefici sul cervello di esercizi fisici cognitivamente stimolanti potrebbero derivare in particolare da due cambiamenti evolutivi che hanno reso gli esseri umani fisicamente più attivi dei nostri cugini primati e potenziato la nostra capacità di multitasking: il passaggio all'andatura in stazione eretta e l'adozione della caccia e della raccolta come strategie di sostentamento.

Bipedismo

Circa 6 o 7 milioni di anni fa gli antenati degli esseri umani abbandonarono l'andatura sui quattro arti per camminare in stazione eretta sugli arti posteriori, come noi. Il passaggio dalla locomozione quadrupede a quella bipede introdusse problemi di equilibrio che potrebbero avere imposto nuove richieste al nostro cervello.

Caccia e raccolta

Circa 2 milioni di anni fa i nostri antenati cominciarono a procurarsi il cibo in modo nuovo, cacciando animali e raccogliendo piante. Questa strategia prevede un'attività molto più aerobica di quella osservata in altre grandi scimmie antropomorfe, la cui sussistenza si basa essenzialmente sulle piante. E richiede che il cervello esegua una serie di compiti cognitivi mentre si sposta.

di relativamente sedentarie, che si nutrivano perlopiù di piante. Tuttavia, circa 2 milioni di anni fa, quando gli habitat si prosciugarono per via del raffreddamento climatico, almeno un gruppo di umani ancestrali cominciò a procurarsi cibo in modo nuovo, cacciando animali e raccogliendo cibi vegetali. Caccia e raccolta prevalsero come strategie di sussistenza umana per quasi 2 milioni di anni, fino all'avvento di agricoltura e pastorizia, circa 10.000 anni fa. Con Herman Pontzer, della Duke University, e Brian Wood, dell'Università della California a Los Angeles, abbiamo dimostrato che, a causa delle lunghe distanze percorse alla ricerca di cibo, caccia e raccolta implicano un'attività aerobica molto più grande di quella osservata in altre grandi scimmie.

Richieste crescenti al cervello hanno accompagnato questo passaggio a uno stile di vita fisicamente più attivo. Quando si procacciano il cibo in luoghi lontani, i cacciatori-raccoglitori devono fare una ricognizione per avere la certezza di sapere dove si trovano. Questo tipo di navigazione spaziale si affida all'ippocampo, la regione cerebrale che trae beneficio dall'esercizio fisico e tende ad atrofizzarsi quando invecchiamo. Essi devono poi scrutare il paesaggio per cercare indizi di cibo, usando informazioni sensoriali dai sistemi visivo e uditivo. Devono poi ricordare dove erano stati in precedenza e quando particolari generi di cibo erano disponibili. Il cervello usa questa informazione dalla memoria a breve e a lungo termine, permettendo alle persone di prendere decisioni e di pianificare i percorsi, compiti cognitivi favoriti, tra l'altro, dall'ippocampo e dalla corteccia prefrontale. I cacciatori-raccoglitori vanno spesso alla ricerca di cibo in gruppi, e in questo caso potrebbero instaurare conversazioni mentre il cervello conserva il loro equilibrio e registra la loro posizione nell'ambiente. Questa molteplice attività – multitasking, diremmo oggi – è controllata in parte dalla corteccia prefrontale, che tende a sua volta a ridursi con l'età.

Sebbene qualsiasi animale in cerca di cibo debba orientarsi e farsi un'idea di dove trovarlo, i cacciatori-raccoglitori devono svolgere queste funzioni di buon passo durante escursioni che si estendono anche per 20 chilometri. A velocità sostenute, il multitasking diventa via via più complicato e richiede una più rapida elaborazione delle informazioni. Evolutivamente, sarebbe ragionevole avere un cervello pronto a rispondere a una gamma di sfide durante e dopo la ricerca di cibo, per ottimizzare le probabilità di successo in questa ricerca. Ma le risorse fisiologiche necessarie per costruire e nutrire un cervello di questo tipo – incluse quelle che promuovono nascita e sopravvivenza di nuovi neuroni – hanno un costo energetico per l'organismo. Significa che, se non usiamo il sistema, probabilmente perderemo questi benefici.

Questa prospettiva, propria della neuroscienza evolutiva, sul rapporto tra esercizio fisico e cervello, e che abbiamo esposto in un articolo del 2017 su «Trends in Neurosciences», ha implicazioni profonde per gli esseri umani di oggi. Nella società moderna non è necessaria un'attività fisica aerobica per trovare il cibo necessario alla sopravvivenza. L'atrofia del cervello e i conseguenti declini cognitivi che si manifestano comunemente nell'invecchiamento potrebbero essere legati in parte alle abitudini sedentarie.

Ma non è detto che il semplice aumento dell'esercizio fisico realizzi appieno il potenziale dell'attività fisica per arginare il declino cognitivo. Il nostro modello indica che persino le persone che già svolgono un'intensa attività aerobica dovrebbero forse ripensare

le proprie abitudini. È possibile che non sempre svolgiamo esercizi fisici che ricavano il massimo vantaggio dai nostri meccanismi evolutivi, volti a favorire le prestazioni del cervello.

Pensate a come molti di noi svolgono gli esercizi aerobici. Spesso andiamo in palestra e usiamo una macchina stazionaria. In allenamenti simili, il compito cognitivamente più impegnativo magari è limitarsi a scegliere il canale sullo schermo incorporato. Ma c'è di più: queste macchine eliminano alcune condizioni necessarie per mantenere l'equilibrio e regolare la velocità, insieme con molte altre sfide cognitive del movimento in un ambiente mutevole.

E se questa forma di esercizio fisico fosse una mera illusione? I nostri antenati si sono evoluti in un mondo imprevedibile. E se potessimo modificare gli esercizi fisici abitudinari includendo sfide cognitive come quelle che affrontavano i nostri avi cacciatori-raccoglitori? Se possiamo incrementare gli effetti dell'esercizio fisico includendo un'attività cognitivamente impegnativa, forse potremmo aumentare l'efficacia di esercizi fisici volti a rafforzare la mente nell'invecchiamento, e addirittura modificare il decorso di malattie neurodegenerative come l'Alzheimer.

Muoviti e pensa

Un numero crescente di prove suggerisce che un esercizio fisico cognitivamente stimolante sarebbe utile al cervello più degli esercizi che non generano sfide cognitive. Per esempio, Gerd Kempermann e i colleghi del Centro per le terapie rigenerative di Dresda hanno indagato questa possibilità, confrontando proliferazione e sopravvivenza di nuovi neuroni nell'ippocampo di topi dopo un esercizio fisico o dopo un esercizio combinato con l'accesso a un ambiente cognitivamente arricchito. Hanno osservato una somma di effetti: il solo esercizio era utile all'ippocampo; ma la combinazione di attività fisica e di sfide cognitive in un ambiente stimolante era più utile ancora: favoriva la nascita di un numero di neuroni persino maggiore. Usare il cervello durante e dopo l'esercizio sembrava portare a una maggiore sopravvivenza dei neuroni.

In futuro individueremo le vie fisiologiche che collegano mente e corpo

Di recente, con altri ricercatori abbiamo esteso questi studi dagli animali agli esseri umani, con risultati incoraggianti. Abbiamo esplorato, per esempio, la combinazione di esercizio fisico e sfide cognitive in soggetti con un chiaro declino cognitivo. Cay Anderson-Hanley, dello Union College di Schenectady, nello Stato di New York, ha esaminato simultaneamente l'esercizio fisico e gli interventi cognitivi in persone con un deficit cognitivo lieve, un disturbo associato con un aumento del rischio di Alzheimer. Saranno necessari altri studi su popolazioni analoghe prima di trarre conclusioni solide. Ma i risultati ottenuti finora indicano che le persone con un declino cognitivo lieve potrebbero trarre giovamento dall'esercizio fisico mentre si divertono con un videogioco mentalmente impegnativo. In studi con adulti in salute, Anderson-Hanley e colleghi hanno anche dimostrato che svolgere un esercizio fisico e dedicarsi simultaneamente a un videogioco cognitivamente impegnativo aumenta il BDNF circolante più del solo esercizio. I risultati corroborano la teoria che il BDNF è decisivo per ottenere nel cervello benefici indotti dall'esercizio fisico.

Nel nostro studio abbiamo concepito un gioco per mettere alla prova i tratti cognitivi che si affievoliscono con l'età e che probabilmente sono necessari nella ricerca del cibo. Nel gioco, i partecipanti si orientano nello spazio e completano esercizi di attenzione e di memoria mentre pedalano con un'intensità aerobica moderata. Per valutare le potenzialità di questa strategia nell'aumentare le prestazioni cognitive in anziani in buona salute stiamo confrontando da un lato un gruppo di persone che svolge l'esercizio fisico mentre si dedica al gioco, dall'altro un gruppo impegnato in un esercizio fisico senza il gioco, un gruppo che svolge il gioco senza esercizio e un gruppo di controllo che si limita a guardare filmati naturalistici. I risultati sono stati finora promettenti.

Molti altri gruppi sperimentano combinazioni di esercizi e di test cognitivi. In un prossimo futuro avremo probabilmente un'idea migliore di come impiegarle al meglio per sostenere e incrementare le capacità cognitive di individui in salute oppure soggetti a un declino cognitivo associato a patologie.

In aggiunta a interventi mirati simili a quelli descritti, è possibile che la partecipazione a sport che combinano esercizi cognitivi e aerobici sia una strada per attivare questi benefici per il cervello. Per esempio abbiamo dimostrato che gli atleti universitari di corsa campestre che si allenano intensamente in sentieri all'aperto hanno una connettività più marcata tra le regioni cerebrali associate a funzioni cognitive esecutive rispetto ai loro coetanei più sedentari. Studi futuri ci permetteranno di capire se i benefici sono anche maggiori di quelli osservati in podisti che si allenano in ambienti meno complessi, su un *tapis roulant* per esempio.

Molte sono le cose ancora da scoprire. Sebbene sia prematuro suggerire prescrizioni che combinano esercizio fisico e attività cognitive, possiamo affermare che l'esercizio è decisivo per preservare la funzionalità cerebrale nell'invecchiamento. Le linee guida dello U.S. Department of Health and Human Services [*e del Ministero della salute italiano, N.d.R.*] suggeriscono che i cittadini dovrebbero dedicarsi all'esercizio aerobico almeno 150 minuti alla settimana con intensità moderata, o almeno 75 minuti alla settimana con intensità vigorosa (o una combinazione equivalente delle due). Esaudire queste raccomandazioni motorie, o essere addirittura più solerti, giova al corpo e potrebbe migliorare la salute del cervello.

Trial clinici saranno molto più eloquenti sull'efficacia di esercizi fisici che richiedono un impegno cognitivo: quali tipi di attività mentale e fisica siano più incisivi, per esempio, oppure l'intensità e la durata ottimali degli esercizi per aumentare le capacità cognitive. Ma, alla luce delle prove di cui disponiamo, crediamo che, proseguendo con ricerche accurate, individueremo le vie fisiologiche che collegano cervello e corpo; e useremo le capacità adattative, frutto dell'evoluzione, della plasticità indotta dall'esercizio nell'invecchiamento. In definitiva, allenare corpo e cervello insieme con l'esercizio fisico ci aiuterebbe a conservare una mente agile per tutta la vita. ■

PER APPROFONDIRE

Exercise, APOE Genotype, and the Evolution of the Human Lifespan. Raichlen D.A. e Alexander G.E., in «Trends in Neurosciences», Vol. 37, n. 5, pp. 247-255, maggio 2014.

Adaptive Capacity: An Evolutionary Neuroscience Model Linking Exercise, Cognition, and Brain Health. Raichlen D.A. e Alexander G.E., in «Trends in Neurosciences», Vol. 40, n. 7, pp. 408-421, luglio 2017.

Differential Associations of Engagement in Physical Activity and Estimated Cardiorespiratory Fitness with Brain Volume in Middle-Aged to Older Adults. Raichlen D.A. e altri, in «Brain Imaging and Behavior», pubblicato on line, 17 giugno 2019.

La rivoluzione dei farmaci a DNA

Il sequenziamento del genoma umano e la possibilità di sintetizzare su misura brevi sequenze di acidi nucleici hanno aperto la strada allo sviluppo di terapie che intervengono direttamente sul DNA

DA SECOLI I MEDICI TRATTANO I SINTOMI, non le cause, della maggior parte delle malattie. Hanno asportato tumori, liberato arterie ostruite, iniettato insulina e lenito febbri, e senza essere in grado di toccare il codice biologico all'interno delle cellule che dice loro di crescere in modo maligno, trasmettere segnali nervosi anomali, consumare troppa energia o troppo poca, e gonfiarsi in un'infiammazione. Questo codice è la molecola di DNA presente in ciascuna cellula, che dice alla cellula che cosa fare e che innesca temibili malattie quando le cose vanno male. La molecola, con i suoi messaggeri, è rimasta nascosta, irraggiungibile per quasi tutti i farmaci, impossibile da riparare quando è danneggiata. Ma oggi non è più così, come spiega questo dossier.

Il cambiamento è cominciato dopo che agli inizi di questo secolo è stata svelata le sequenza di DNA dell'intero genoma umano, e negli ultimi anni la possibilità di sintetizzare e progettare in modo personalizzato brevi sequenze di acidi nucleici ha convinto gli scienziati che la sostanza più adatta per arrivare al DNA è lo stesso DNA. La costruzione di nuovi geni per sostituirne versioni mal funzionanti, o per «silenziarli», ha portato all'approvazione di 14 nuovi farmaci relativi al DNA (*p. 62*). E le ricerche più recenti indicano che queste terapie possono essere ancora più efficaci se gli scienziati abbandonano i classici filamenti lineari e invece sintetizzano sferette di DNA, che entrano più facilmente nelle cellule (*p. 52*). L'analisi del DNA ha anche rivelato nuovi bersagli, mostrando per esempio che è possibile trovare quasi 1000 geni che sono collegati a malattie infantili e che potrebbero essere nuovi obiettivi di trattamento (*p. 58*).

Gli stessi sviluppi scientifici, però, hanno fatto emergere questioni problematiche: per esempio, alcuni test genetici per i più piccoli possono provocare falsi allarmi, e non tutti i bambini che hanno un gene associato a una malattia finiscono per ammalarsi di quella malattia. Le ricerche, poi, hanno rivelato un'ingiusta distorsione dei bersagli nel DNA. La maggior parte dei dati di quelle sequenze è stata ottenuta da soggetti di pelle bianca, e non ha considerato varianti geniche che provocano malattie in persone non bianche; si tratta di una disuguaglianza nella ricerca che, se non verrà corretta, produrrà una disuguaglianza nella salute (*p. 64*). I genetisti stanno iniziando ricerche pensate proprio per migliorare questo livello di diversità. In medicina il DNA ha un grande potere, che dovrebbe essere usato a vantaggio di molti, non di pochi.

Questo rapporto su farmaci a DNA e terapie collegate, pubblicato su «Scientific American» e su «Nature», è sponsorizzato dallo University of Pittsburgh Medical Center (UPMC). È stato prodotto in modo indipendente dalla redazione di «Scientific American», che ha la responsabilità esclusiva di tutto il materiale editoriale. UPMC ha accettato di sponsorizzare l'argomento, ma non ha dato alcun contributo al contenuto.

Josh Fischman, senior editor *di «Scientific American»*

ALL'INTERNO

Illustrazione di copertina e illustrazioni a piena pagina di Enan Liang

SVILUPPO DI FARMACI

Il potere delle sfere

Molecole di DNA o RNA, disposte a formare minuscole sfere, possono aggredire tumori cerebrali e altre malattie che sfuggono ai farmaci progettati in modo convenzionale

di Chad A. Mirkin, Christine Laramy e Kacper Skakuj

IL CANCRO AL CERVELLO È TERRIFICANTE. Attacca un organo che per noi è il nucleo della nostra personalità, della mente, della nostra stessa umanità. È un male notoriamente difficile da trattare, perché il cervello ha evoluto molte difese per tener fuori le sostanze estranee come metodo di autoprotezione, ma queste sostanze includono anche molti farmaci anticancro. Usare il bisturi o le radiazioni nella cittadella stessa della coscienza è tremendamente rischioso.

Per queste ragioni il relativo tasso di sopravvivenza a cinque anni per le persone tra i 55 e i 64 anni di età colpite da glioblastoma, il più frequente tipo di tumore cerebrale primario, è un triste 5 per cento. Ogni anno neiu soli Stati Uniti 15.000 persone muoiono di questo male [*in Italia ogni anno sono colpite 1500 persone, n.d.R.*].

Noi abbiamo sviluppato un farmaco di dimensioni nanometriche che viaggia nel corpo ed entra nel cervello, dove può uccidere le cellule tumorali. Le particelle del farmaco sono composte da oligonucleotidi – cioè filamenti di DNA o RNA, le molecole di cui è fatto il codice principale che dice a ogni cellula che cosa deve fare – che sporgono da un nucleo centrale come le tante spine di un riccio di mare. Queste particelle rotonde spinose sono dette acidi nucleici sferici, o SNA. In un test clinico iniziale condotto su otto pazienti, queste sfere sono entrate nelle cellule del glioblastoma e si sono legate ad alcune molecole codificanti che hanno un ruolo chiave nella crescita inarrestabile del cancro.

Questo tipo di farmaci sferici sembra efficace contro una varietà di malattie. Un'altra terribile sofferenza è l'atrofia muscolare spinale, o SMA, che colpisce i bambini appena nati. Toglie ai piccoli il controllo dei muscoli, finché inghiottire e respirare diventa prima difficile e alla fine impossibile. La maggior parte delle vittime di questo disturbo muore prima di andare all'asilo, e fino a poco tempo fa non c'era aiuto che i medici potessero offrire. Nel 2016 la Food and Drug Administration degli Stati Uniti ha approvato un trattamento: è un farmaco chiamato Spinraza, iniettato direttamente nel cordone spinale più volte l'anno, e al costo di 125.000 dollari a iniezione è uno dei farmaci più costosi al mondo. Di recente in studi sui roditori abbiamo confrontato le nostre sfere, costellate di acidi nucleici che entrano nelle cellule e interferiscono con le molecole messaggere che portano ai sintomi della SMA, con l'approccio basato su Spinraza. Le sfere hanno aumentato la sopravvivenza di quattro volte – 115 giorni invece di 28 – con un tasso di effetti tossici assai minore.

Gli acidi nucleici sferici evitano i problemi che hanno pesato sui tentativi di sviluppare nuovi farmaci. Quelli convenzionali sono aspecifici, ovvero sono farmaci che possono agire su molti organi e cellule, non solo su quelli malati: quindi hanno numerosi effetti collaterali. Gli acidi nucleici, invece, possono essere progettati per interferire solo con i geni che provocano malattie, o con le

molecole che trasmettono le istruzioni date dai geni per controllare il comportamento della cellula. In passato i biologi hanno già cercato di usare gli acidi nucleici, ma principalmente sotto forma di molecole lineari, con scarse possibilità di controllare dove andavano a finire. E poiché il corpo è dotato di solide difese contro il materiale genetico estraneo – a cominciare dal sistema immunitario – nella maggior parte dei casi queste difese danneggiavano immediatamente il farmaco o lo deviavano verso organi deputati all'eliminazione delle scorie come fegato e reni.

Gli SNA invece, con un diametro di qualche miliardesimo di metro, sembrano in grado di arrivare in ogni parte del corpo ed entrare nelle cellule prima di essere intercettati dalle difese immunitarie. La forma sferica ci permette di ottenere un'elevata densità di «spine» di acido nucleico in uno spazio ridotto, ed è proprio grazie a questa densità che sono assai forti le interazioni tra spine e recettori della superficie cellulare che consentono l'ingresso delle particelle. All'interno, la sequenza dei componenti delle spine – gli stessi nucleotidi, abbreviati con A, T, C e G, che costituiscono il codice della vita – assicura che interagiscano solo con le sequenze complementari di DNA o RNA (in quest'ultima molecola è presente U – per uracile – invece di T, e noi ne teniamo conto.) Costruiamo i nostri filamenti in modo che corrispondano solo alle sequenze cellulari che sono cruciali per la malattia. Gli SNA non sono pallottole magiche, e dovranno superare molti altri test prima di poter essere usati su un gran numero di pazienti. Ma le potenzialità ci sono: dato che i componenti nucleici possono essere riordinati per interagire con numerose molecole patogene nelle cellule, le sfere hanno la capacità di contrastare alcune delle condizioni più debilitanti al mondo.

Farmaci programmabili

Tradizionalmente, gli scienziati hanno trovato trattamenti per malattie studiando centinaia di migliaia di piccole molecole naturali o di sintesi, seguendo un lungo processo per tentativi ed errori per vedere se qualche molecola studiata avesse effetti terapeutici. Questa procedura ha portato a molti farmaci straordinari, come gli antibiotici, ma anche i farmaci più promettenti possono avere effetti collaterali indesiderati. Inoltre, molte altre malattie non reagiscono a queste molecole, quindi non abbiamo ancora modo di curarle. Addirittura i farmaci biologici, una nuova classe di farmaci spesso basati su proteine prodotte da cellule immunitarie di topo, coniglio o altri animali, passano per un processo di scoperta per tentativi ed errori, anche se più breve.

Un processo ideale dovrebbe invece permettere agli scienziati di progettare razionalmente e velocemente farmaci specifici che usano lo stesso linguaggio delle nostre cellule, senza dover cercare una molecola come fosse un ago in un pagliaio. Le cellule trasmettono molti messaggi complessi con DNA e RNA per produrre milioni di proteine. Il numero di passaggi che le cellule devono compiere correttamente per sintetizzare le proteine è impressionante: devono selezionare una specifica sequenza di DNA composta dai nucleotidi A, T, C e G, trascrivere la sequenza in una molecola detta RNA messaggero (mRNA) e poi leggere questo mRNA per disporre altre molecole, gli amminoacidi, nella catena – lunga anche 35.000 unità – che forma una singola proteina.

Gli errori in cui un nucleotide, per esempio T o G, è aggiunto, eliminato o messo nel posto sbagliato possono bloccare la produzione della proteina o generarne una versione sbagliata, che a volte può provocare una malattia. Anche un eccesso di copie di un certo mRNA, e dunque della relativa proteina, può portare a malattie. E può farlo anche l'introduzione di acidi nucleici estranei da parte dei virus, che costringe le cellule infettate a fabbricare proteine virali dannose.

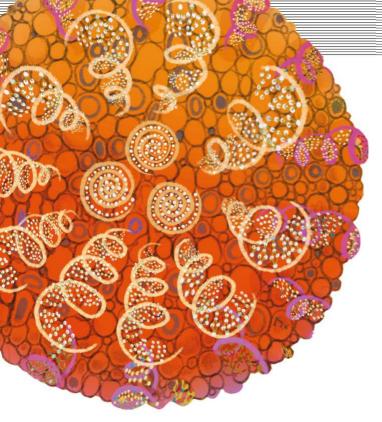
Anche noi però possiamo sintetizzare oligonucleotidi. Dato che l'alfabeto genetico risponde a regole molto specifiche – A può legarsi solo con T, e C solo con G – possiamo dare ai nostri oligonucleotidi sequenze che si legano selettivamente alle sequenze che danno origine a una malattia, disattivandole. Una volta legati, i nostri oligonucleotidi sintetici inceppano il meccanismo cellulare, e impediscono alla cellula interessata di produrre la proteina che porta alla malattia.

Eppure, malgrado ci siano dispositivi automatici con cui produrre rapidamente oligonucleotidi sintetici di qualunque sequenza si voglia, i farmaci basati su oligonucleotidi finora approvati per l'uso nei pazienti sono meno di una dozzina. Il motivo è che questi filamenti, una volta iniettati nel flusso sanguigno, trovano un serio ostacolo: dato che sono estranei – cioè non nativi del paziente – sono trattati come sostanze pericolose o materiali di scarto. Per questo motivo sono distrutti dal sistema immunitario oppure sono rimossi dalle stazioni di depurazione del corpo, fegato e reni, e quindi non arrivano al bersaglio cui erano diretti. E anche se un filamento oligonucleotidico riesce a raggiungere una cellula con l'mRNA bersaglio, la membrana esterna della cellula fa da barriera e impedisce agli oligonucleotidi di penetrare all'interno. Il risultato è che le case farmaceutiche che lavorano con gli oligonucleotidi si sono spesso accontentate di curare malattie in cui il fegato è il bersaglio. Il fegato è un organo importante, ma il fatto che questi farmaci rimangano bloccati in un'unica sede è un grosso limite.

Con un diametro di qualche miliardesimo di metro, gli SNA sembrano in grado di arrivare in ogni parte del corpo ed entrare nelle cellule prima di essere intercettati dalle cellule immunitarie

Un approccio alternativo – iniettare gli oligonucleotidi direttamente nel sito colpito dalla malattia, come nel caso di Spinraza, iniettato nella colonna spinale, è tecnicamente difficile, e comunque non assicura che il farmaco entri nelle cellule giuste.

Un risultato sorprendente

I progressi nelle nanotecnologie realizzati dal nostro gruppo alla Northwestern University, e da molti ricercatori di altri gruppi, ci hanno portato agli SNA, che potrebbero permettere di aggirare il problema. Prima del 2006 ci eravamo interessati alla possibilità di usare le capacità di legame altamente specifiche degli SNA in sonde per esami diagnostici ultrasensibili: per esempio per rilevare tratti di DNA tumorale in campioni di sangue. Siamo riusciti a farlo decorando per via chimica una nanoparticella d'oro con molti filamenti di DNA progettati per ancorarsi con un'estremità alla nanoparticella stessa, producendo la configurazione a riccio di

mare. L'estremità esterna dei filamenti aveva una sequenza complementare a quella del DNA tumorale, quindi il tutto funzionava bene come sonda. Abbiamo usato queste sfere anche come «atomi» artificiali dai legami programmabili per realizzare nuovi tipi di materiali. La progettazione di farmaci, però, non era nel mirino. Dopotutto, secondo il paradigma dominante della chimica e della biologia dei farmaci, RNA e DNA non avrebbero attraversato in modo naturale le membrane cellulari.

Tuttavia eravamo curiosi di vedere come avrebbero interagito con i sistemi viventi gli acidi nucleici disposti in questa nuova configurazione geometrica. Gli sviluppatori di farmaci avevano già sperimentato singoli filamenti oligonucleotidici ma con un successo limitato, come abbiamo visto. Dalle nostre ricerche sugli SNA come piattaforma diagnostica, sapevamo che DNA e RNA bersaglio si sarebbero legati ai nostri agglomerati spinosi con molta più forza rispetto a quello che avrebbero fatto con i filamenti oligonucleotidici liberi. Il motivo è che le nostre spine sono densamente impacchettate sulla superficie della nanoparticella e questo le rende più rigide, facilitando il corretto allineamento e il legame delle subunità A, T, C e G di ciascun filamento quando incontrano un filamento bersaglio. Questa caratteristica ci ha fatto pensare che, con la giusta sequenza nucleotidica, gli SNA potessero diventare potenti farmaci oligonucleotidici.

Per testare questa idea abbiamo effettuato un esperimento a cui, allora, attribuivamo scarse possibilità di riuscita. Abbiamo preso filamenti oligonucleotidici liberi e li abbiamo messi in provetta con cellule di topo. In un'altra provetta con cellule di topo dello stesso tipo abbiamo aggiunto SNA. Avevamo legato molecole fluorescenti rosse sia ai filamenti liberi sia alle sfere, in modo da seguire entrambi. Quando abbiamo osservato le cellule al microscopio a fluorescenza, quelle miscelate con i filamenti liberi apparivano trasparenti, come in effetti ci aspettavamo: gli oligonucleotidi liberi non avevano attraversato la membrana cellulare. Ma le cellule miscelate con gli SNA accendevano lo schermo di rosso: gli acidi nucleici sferici erano riusciti a entrare!

Come era potuto accadere? Le membrane cellulari regolano strettamente i tipi di molecole che possono entrare, e gli oligonucleotidi non sono nella lista degli ospiti ammessi. In più gli oligonucleotidi portano una carica elettrica negativa, come anche le superfici cellulari. I due oggetti biologici dovrebbero quindi respingersi come due magneti. Eppure quando abbiamo ripetuto l'esperimento più volte, su oltre 50 tipi cellulari umani e animali, tutti tranne uno si sono accesi di rosso, segnalando il successo.

Oggi pensiamo di sapere da dove passano: un tipo di molecole dette recettori «spazzini» (*scavenger*) che sono distribuite sulla superficie cellulare e che hanno la funzione di via di accesso selettiva. Questi recettori hanno un ruolo di rilievo nei rapporti della cellula con l'ambiente circostante; per esempio lasciano passare le molecole di dimensioni nanometriche di cui le cellule hanno bisogno. Alcuni caratteri strutturali delle terminazioni delle spine di SNA possono imitare i substrati naturali di questi recettori spazzini. Abbiamo già osservato che i filamenti sulle sfere sono impacchettati ad alta densità e, come avviene nel velcro, più grande è il numero di uncini più forte è il legame. I filamenti liberi, anche se i recettori spazzini li riconoscono come molecole da far entrare, hanno un solo uncino, dunque finiscono per fluttuare via.

Al microscopio elettronico abbiamo visto che quando un SNA si lega a questi recettori, la membrana circostante si ripiega all'interno formando una tasca che porta l'SNA nella cellula.

Le sfere come medicine

Entrare, però, è solo il primo passo. Per funzionare come farmaco, un acido nucleico sferico deve trovare il particolare tratto di mRNA che istruisce la cellula a sintetizzare una proteina associata a una malattia, legarsi a esso e disattivarlo.

Il primo tratto di mRNA che abbiamo preso di mira in una cellula non provoca malattie ma istruisce la cellula a sintetizzare una proteina che diventa verde brillante al microscopio. L'obiettivo era bloccare questo mRNA. Quando abbiamo esposto cellule di topo a un SNA sintetizzato in modo da corrispondere all'mRNA che provoca la fluorescenza verde, e le abbiamo paragonate a cellule simili ma non esposte, la differenza è stata chiara: le cellule senza sfere brillavano di verde, mostrando che l'mRNA aveva diretto la sintesi della relativa proteina; quelle esposte ai nostri SNA erano trasparenti, indicando che avevamo bloccato l'mRNA prima che potesse trasmettere l'istruzione di sintetizzare qualcosa di verde, come abbiamo riferito su «Science» nel 2006.

Poi abbiamo testato gli SNA rispetto al grande problema dei farmaci basati su oligonucleotidi lineari: la distruzione da parte dei sistemi di difesa naturali del corpo. Abbiamo trovato che la forte carica elettrica delle nostre sfere, anch'essa dovuta all'alta densità di impacchettamento, le aiutava a sfuggire all'interferenza del sistema immunitario. Questa carica elevata inibisce l'avvicinamento di proteine difensive dette nucleasi, che degradano DNA e RNA estranei.

Alla prova dei fatti

Eravamo sulla buona strada, almeno in condizioni di laboratorio. Altri scienziati hanno riprodotto e portato avanti indipendentemente alcuni aspetti del nostro lavoro, come la dermatologa Amy Paller, l'esperto di SMA Arthur Burghes, lo specialista di immunoterapie Bin Zhang, l'esperto di biologia del cancro Alex Stegh, il chirurgo specializzato in trapianti Jason Wertheim e l'oncologa Priya Kumthekar. Ma il percorso dalle scoperte di laboratorio al miglioramento delle condizioni dei pazienti è lungo e difficile;

così, quasi dieci anni fa ricercatori del nostro gruppo hanno fondato un'azienda chiamata Exicure per accelerare il passaggio dei farmaci basati sugli SNA alla pratica clinica.

All'inizio abbiamo esplorato la possibilità di somministrare questi potenti farmaci a tessuti malati tramite creme per la pelle o colliri, una strategia fattibile perché gli SNA sono assorbiti con facilità dalle cellule, e nettamente migliore rispetto a strategie invasive come l'iniezione diretta. Due dei nostri primi bersagli sono stati la psoriasi e le ferite che guariscono con difficoltà, e per alcune di queste malattie diversi candidati promettenti e basati su SNA sono già nei primi stadi di sperimentazione clinica.

Arrivare alla pelle, ovviamente, è relativamente facile. Ma non lo è affatto arrivare al cervello. Difeso da un vigile sistema immunitario e da una rete di vasi sanguigni – la barriera ematoencefalica – che tengono fuori molecole estranee, il cervello rende particolarmente difficile la cura di tumori come il glioblastoma. Abbiamo però pensato che gli SNA potessero attraversare queste difese grazie alle stesse molecole che ne facilitano il passaggio tra le membrane cellulari. Una volta nel cervello, le sfere potrebbero arrivare alle cellule tumorali prendendo di mira geni e proteine che tengono in vita le cellule, prodotte in quantità eccessive dalle neoplasie.

Per avviare questo progetto abbiamo creato un farmaco a SNA con tanti brevi tratti di RNA concepiti per bloccare la produzione nelle cellule di glioblastoma di una proteina chiamata Bcl2L12. Questa proteina agisce da difensore biochimico che aiuta a mantenere funzionanti le cellule tumorali. Abbiamo pensato che l'SNA avrebbe potuto rendere il cancro vulnerabile ai farmaci convenzionali intercettando l'mRNA che dice alle cellule di produrre questa proteina.

Nei nostri studi sugli animali, pubblicati nel 2013 su «Science Translational Medicine», avveniva proprio questo: gli SNA iniettati nel flusso sanguigno dei topi raggiungevano il cervello, attraversavano la barriera ematoencefalica e impedivano la produzione della proteina Bcl2L12 nelle cellule del glioblastoma. L'anno scorso, i primi risultati clinici hanno mostrato che questi SNA raggiungono le cellule di glioblastoma nei pazienti umani. Non abbiamo guarito nessuno e ancora dobbiamo verificare se gli SNA rendono più vulnerabili le cellule tumorali. Tuttavia, la capacità degli acidi nucleici sferici di raggiungere il cervello e l'assenza di tossicità degli SNA alimentano la speranza per il trattamento di questo cancro e anche di altri disturbi neurologici, e preparano il terreno per la prossima serie di sperimentazioni cliniche. Inoltre, i test effettuati per altre malattie, come l'atrofia muscolare spinale, sembrano promettenti sui modelli animali.

Un'altra possibilità entusiasmante è l'uso degli SNA nell'immunoterapia contro il cancro. Spesso le cellule tumorali hanno proteine di membrana diverse da quelle delle cellule sane. Di conseguenza le proteine di membrana delle cellule tumorali possono fare da bandierina di segnalazione; e se il sistema immunitario può essere addestrato ad attaccarle come farebbe con un virus influenzale, allora il nostro stesso corpo può difenderci meglio da questa malattia.

Per realizzare un vaccino anti-cancro a SNA, invece del nucleo d'oro della nanoparticella abbiamo preso una particella vuota detta liposoma, l'abbiamo riempita con una di queste proteine-segnale e l'abbiamo iniettata in animali con il tumore corrispondente. Alcuni dei nostri ultimi esperimenti, pubblicati nel 2019 sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», hanno mostrato che questi acidi nucleici sferici suscitano una risposta immunitaria immediata contro il tumore, a quanto pare istruendo il sistema immunitario affinché aggredisca le cellule con la molecola segnale. L'effetto, inoltre, sembra essere duraturo: il sistema immunitario continua ad attaccare le cellule con la proteina anche dopo che gli SNA sono spariti. Questi SNA stanno già dimostrando efficacia e sicurezza in trial di fase I sulle persone, e altre sfere dirette contro un tumore cutaneo letale testati in altri trial che valutano la sicurezza.

Gli SNA, però, sono farmaci non ancora approvati. C'è una serie di sfide che prima devono superare. Dato che le sfere arrivano a una vasta gamma di cellule, dobbiamo studiare con attenzione se producano o meno effetti negativi «fuori bersaglio», anche se il modo in cui sono progettate dovrebbe limitarle solo a DNA e RNA problematici. È necessario studiare popolazioni di pazienti più ampie e bisogna riuscire a raggiungere il bersaglio effettivo con maggior precisione per aumentare la quantità di farmaco che arriva all'organo e alle cellule malati.

La capacità degli SNA di raggiungere il cervello e l'assenza di tossicità degli acidi nucleici sferici alimentano la speranza per il trattamento di una grave forma di cancro e di altri disturbi neurologici

Noi riteniamo che la capacità degli SNA di accedere a tanti tessuti diversi sia una novità dirompente, che sarà centrale per far emergere e diffondere questo genere di farmaci. Gli acidi nucleici sferici sono il prodotto di tre capacità essenziali: quella di sintetizzare grandi quantità di oligonucleotidi, la comprensione delle vie genetiche coinvolte nelle malattie e la capacità di far arrivare gli oligonucleotidi nei tessuti e nelle cellule dove servono. Le prime due abilità sono importanti, ma senza la terza sarebbe un po' come avere un programma informatico senza l'*hardware* su cui farlo girare.

Gli acidi nucleici sferici potrebbero essere proprio questo hardware cruciale e versatile: una piattaforma da poter usare per molti tipi di malattia, una che spinga l'industria farmaceutica a lasciare la difficile strada della ricerca di molecole nuove per ogni nuovo trattamento. Con gli SNA, basta semplicemente un nuovo gruppo di oligonucleotidi per aggredire una nuova malattia. E siamo solo all'inizio. ■

Chad A. Mirkin è il direttore dell'International Institute for Nanotechnologies, con incarichi di insegnamento e cattedre in chimica, ingegneria chimica e biologica, ingegneria biomedica, scienza dei materiali e medicina alla Northwestern University. È tra i fondatori di Exicure, azienda che sviluppare farmaci dagli acidi nucleici sferici.

Christine Laramy ha conseguito il PhD in ingegneria chimica e biologica presso la Northwestern University, e ora lavora come analista nello studio legale Latham and Watkins.

Kacper Skakuj è *graduate student* del Dipartimento di chimica della Northwestern University.

COME FUNZIONANO GLI SNA

Curare il DNA con il DNA

Nella cellula, il DNA aberrante – e l'RNA messaggero (mRNA) che quel DNA sfrutta per dire alla cellula che cosa fare – può provocare malattie. Gli scienziati sono in grado di sintetizzare DNA che si lega in modo specifico a queste molecole problematiche. Una volta organizzato in acidi nucleici sferici (SNA), il DNA sintetizzato entra nelle cellule e interferisce con le molecole che causano problemi.

Gli SNA partono da un nucleo, che spesso è una particella detta liposoma. Il DNA a singolo filamento, sintetizzato in base a esigenze specifiche, è densamente impacchettato attorno al nucleo.

Nanoparticella che fa da nucleo

Ancoraggio

DNA a singolo filamento

Disegni non in scala

Limiti lineari

I farmaci a DNA o RNA sono stati testati nella forma più tipica di queste molecole, quella lineare, e possono funzionare; spesso però hanno difficoltà nell'entrare nelle cellule o sono distrutti dalle difese immunitarie. In genere bisogna iniettarli direttamente nel sito malato, limitando l'uso di questi farmaci.

Forma lineare (oligonucleotide)

Successo sferico

Sulla superficie degli SNA, i tanti filamenti di DNA hanno numerosi punti di legame per le «porte» cellulari dette «recettori spazzini», invece dell'unico gancio di un filamento libero. Dunque le sfere sono assorbite nelle cellule con più facilità.

Cellula bersaglio

mRNA espresso in misura eccessiva

La malattia continua

Le molecole di mRNA associate alla malattia, con le istruzioni per sintetizzare le proteine sbagliate, non trovano ostacoli.

Proteine indesiderate

Le piccole molecole dei farmaci tradizionali prendono di mira le proteine risultanti

Recettori spazzini

mRNA catturato

Meno proteine indesiderate

La malattia è interrotta

La sequenza specifica dell'SNA si lega solo all'mRNA coinvolto nella malattia, ignorando le altre molecole. Una volta catturato in questo modo, l'mRNA non può più dire alla cellula di sintetizzare le proteine dannose.

Illustrazione di Emilia Cooper

TEST MEDICI

I geni del bambino

Oggi possiamo cercare migliaia di malattie genetiche nel DNA dei neonati, ma non sempre è la cosa più sensata da fare

di Tanya Lewis

MITCHELL GORBY È VENUTO AL MONDO verso le 15.00 del 9 agosto 2019 al Balboa Naval Hospital di San Diego, in California. Il neonato sembrava sano e i suoi genitori, Tiffany e Rylan, erano emozionati. Qualche ora più tardi però un'infermiera ha notato che Mitchell sembrava letargico e non piangeva mai, e gli strumenti di monitoraggio indicavano che al suo piccolo corpo non arrivava abbastanza ossigeno.

Il piccolo è stato trasferito d'urgenza all'unità di terapia intensiva neonatale del vicino Rady Children Hospital, dove alcuni esami hanno mostrato che l'ossigeno non si legava all'emoglobina, la molecola che lo trasporta nel sangue, e che i globuli rossi di Mitchell stavano morendo. Il piccolo non prendeva il latte dalla madre, quindi gli è stato messo un sondino per l'alimentazione artificiale. Il suo medico ha richiesto una tomografia computerizzata e scansioni cerebrali, e anche esami per le malattie infettive; ma non è riuscito a capire che cosa non andava. Come ultima spiaggia, il medico ha suggerito di sequenziare il genoma di Mitchell.

Dopo circa 48 ore sono arrivati i risultati, ottenuti dal laboratorio di Stephen Kingsmore al Rady Hospital. Mitchell aveva una mutazione rara, denominata «emoglobina Toms River», che impedisce all'ossigeno di legarsi alla proteina dei globuli rossi fetali. La mutazione – che prende il nome dalla cittadina statunitense in New Jersey da cui veniva il primo paziente in cui è stato identificato il problema, nel 2011 – riguarda solo l'emoglobina fetale: i piccoli iniziano a produrre emoglobina adulta normale nel giro di qualche mese. I medici dovevano solo tenere in vita Mitchell fino a quel momento. Jeanne Carroll, neonatologa del Rady, dice che «avere il suo genoma completo ci ha dato il punto di partenza» per curarlo nel modo più appropriato. Carroll ha prescritto una serie di trasfusioni e il piccolo è rapidamente migliorato. In meno di un mese stava abbastanza bene da essere dimesso e portato a casa.

Una volta per i bambini come Mitchell, nati con una malattia genetica, ci volevano anni prima di arrivare alla diagnosi, e spesso a quel punto era troppo tardi. Oggi invece i progressi nella velocità del sequenziamento genetico e la rapida discesa dei costi hanno reso possibile la ricerca di centinaia o addirittura migliaia di malattie genetiche che si manifestano nell'infanzia. Nell'anno appena passato, decine di ospedali negli Stati Uniti hanno iniziato a offrire la possibilità di sequenziare rapidamente il genoma dei neonati come aiuto per diagnosi di condizioni potenzialmente letali subito dopo la nascita. I ricercatori sono al lavoro per capire se sia o meno il caso di offrire il sequenziamento a tutti i neonati come accertamento sanitario di *routine*. E sul modello dei test come 23andMe, diretti ai consumatori, aziende come Sema4 e BabyGenes spingono sul mercato test rivolti ai genitori che desiderano saperne di più sulla salute dei loro bambini. Secondo le attese, il mercato del sequenziamento prenatale e neonatale dovrebbe crescere fino a 11,2 miliardi di dollari nel 2027, dai 4 miliardi del 2018.

I proponenti sostengono che i test genetici per neonati possono aiutare a diagnosticare in casi urgenti una malattia con insorgenza infantile potenzialmente mortale, e far aumentare in modo spettacolare il numero di condizioni genetiche oggetto di *screening* neonatale per tutti i bambini, permettendo diagnosi e cure precoci. Questi test, inoltre, potrebbero informare i genitori di condizioni che rischiano di trasmettere ad altri futuri figli, o rivelare che sono essi stessi a rischio di malattie che insorgono nell'età adulta. Gli esami genetici potrebbero rivelare centinaia o anche migliaia di malattie, un ordine di grandezza in più degli attuali test effettuati sul sangue prelevato dal tallone – che negli Stati Uniti sono eseguiti su tutti i neonati – o confermare i risultati di questi test.

Altri, tuttavia, avvertono che gli esami genetici potrebbero fare più male che bene. Potrebbero non rivelare malattie che invece il test del sangue prelevato dal tallone riesce a individuare e produrre falsi positivi per altre, generando ansia e richieste di ulteriori test non necessari. Inoltre, sequenziare il DNA dei bambini

solleva questioni di consenso e prospettive di discriminazione su base genetica.

A prescindere da queste preoccupazioni, gli esami genetici neonatali ormai esistono, e probabilmente diventeranno sempre più comuni. Ma questa tecnologia è già abbastanza raffinata da avere un'utilità reale per la maggior parte dei neonati? E le famiglie – e la società – sono pronte a gestire queste informazioni?

Un programma per valutare rischi e benefici

Negli anni sessanta il microbiologo Robert Guthrie sviluppò un test per la fenilchetonuria (PKU), un disturbo genetico che provoca l'accumulo dell'amminoacido fenilalanina nel corpo. La malattia si può facilmente curare con una dieta povera di fenilalanina, ma se non è trattata causa danni cerebrali e ritardo mentale. Nel giro di qualche anno vari Stati degli Stati Uniti imposero la somministrazione del test di Guthrie ai neonati, a cui subito sarebbero seguiti test per altre condizioni. A metà degli anni ottanta erano in vigore programmi obbligatori di screening nella maggior parte degli Stati. Nel 2002 il Governo federale ha chiesto all'American College of Medical Genetics di elaborare linee guida per gli screening neonatali, culminate nel Recommended Universal Screening Panel, un gruppo di 35 condizioni primarie, e 25 condizioni secondarie suscettibili di trattamento. Oggi la maggior parte degli Stati effettua test per un sottoinsieme di queste condizioni.

Negli esseri umani sono note circa 14.000 malattie genetiche, che vanno da quelle a insorgenza infantile come la PKU e le cardiopatie congenite ad altre che insorgono nell'età adulta come la malattia di Huntington e le forme ereditabili del cancro. Alcune malattie dell'infanzia, come la PKU, sono curabili se affrontate precocemente. I test sul sangue prelevato dal tallone, però, cercano solo di una minima frazione di queste malattie, ecco il motivo dell'interesse per i test genetici.

All'inizio di questo decennio, ricercatori del National Institute of Child Health and Human Development e del National Human Genome Research Institute hanno lanciato un programma, denominato NSIGHT, per valutare rischi e benefici degli screening neonatali. Kingsmore, del Rady Hospital, ha diretto uno dei quattro progetti finanziati da NSIGHT, esaminando l'uso dei metodi di sequenziamento rapido dell'intero genoma per i neonati in condizioni di estrema gravità e con un sospetto di malattia genetica.

Il sequenziamento standard può richiedere settimane, ma grazie a un metodo rapido e a un programma che confronta il genoma con le caratteristiche della malattia del paziente, il gruppo di Kingsmore ha ottenuto diagnosi genetiche in appena un giorno o due. Per questi neonati, qualche ora o qualche giorno può equivalere alla differenza tra la vita e la morte, o a una grave disabilità. Il primo dei due trial effettuati da Kingsmore ha avuto luogo dal 2014 al 2016 al Children's Mercy Hospital di Kansas City, il secondo dal 2017 al 2019 al Rady Children Hospital. L'anno scorso il gruppo ha offerto il sequenziamento neonatale a 23 ospedali in tutto il paese, e alcuni legislatori della California hanno introdotto una normativa federale per coprire il costo del sequenziamento per neonati in condizioni critiche tramite il programma di assistenza sanitaria pubblica Medicaid. Fino allo scorso novembre, Kingsman e colleghi avevano sequenziato il genoma di oltre 1100 neonati con sospetta malattia genetica. Fra questi, a circa uno su tre è stata diagnosticata una malattia, e per uno su quattro è stato modificato il trattamento sanitario come conseguenza.

Mitchell è uno dei neonati il cui genoma è stato sequenziato al Rady Hospital (ma non nel contesto di NSIGHT). Carrol, la neonatologa del Rady, ha detto che l'informazione ottenuta è servita «a fargli nuove trasfusioni senza incertezze, ed evitargli altri esami». È possibile che Mitchell avrebbe potuto superare la malattia anche senza esame e diagnosi. Ma in altri casi molto probabilmente il sequenziamento ha salvato vite. Per di più, probabilmente, ha ridotto di molto l'odissea diagnostica che questi bambini devono affrontare, dice Kingsmore.

Sequenze per lo screening

I neonati gravemente malati non sono gli unici che potrebbero beneficiare dei test genetici. Un altro progetto di NSIGHT ha verificato l'utilità del sequenziamento in ambito clinico come tecnica di screening dei neonati che non mostrano ovvi segni di malattia.

Per questo studio, denominato BabySeq Project, Robert Green, del Brigham and Women's Hospital, Alan Beggs, della Harvard Medical School, e i loro colleghi hanno reclutato alcune famiglie e per metà di esse scelte a caso hanno sequenziato il genoma dei neonati. Hanno elaborato una lista di circa 1500 geni altamente associati a malattie che insorgono nell'infanzia o nell'adolescenza e poi hanno comunicato alle famiglie le informazioni ottenute su un sottoinsieme di questi geni. Lo scopo era effettuare i test più completi possibili: scoprire tutto il possibile sui rischi posti dai geni dei piccoli. Lo scorso gennaio il gruppo ha riferito i risultati del sequenziamento dei genomi di 159 neonati, per la maggior parte sani ma in qualche caso ricoverati in unità di terapia neonatale intensiva. Gli scienziati hanno trovato che il 9,4 per cento del gruppo dei sani aveva un rischio di sviluppare una malattia a insorgenza infantile che non era noto in base alla storia medica o familiare, e l'88 per cento di essi era portatore di malattie recessive.

Negli Stati Uniti il sequenziamento in ambito clinico e la sua interpretazione sono fuori portata per le famiglie senza assicurazione sanitaria

In definitiva, per i genitori è valsa la pena fare i test? Natalie, una madre che ha chiesto di essere citata solo con il nome di battesimo per motivi di privacy, ha un figlio che fa parte del BabySeq. Natalie, medico a Washington, ammette di aver guardato ai test con un certo nervosismo. «Ogni opportunità di sapere qualcosa sulla salute di tuo figlio è motivo di ansia», dice. Nel complesso, però, sia lei che suo marito erano soddisfatti del progetto. «Dato che hanno cercato solo difetti genetici che colpiscono nell'infanzia e solo malattie per cui abbiamo alcune misure preventive, ci è sembrato che potesse essere utile», dice.

Per fortuna i risultati dei test su suo figlio Russell non hanno rivelato disturbi genetici a insorgenza infantile. Hanno indicato invece che potrebbe essere portatore di un difetto metabolico recessivo chiamato malattia di Gaucher, ma il sequenziamento di questo gene è particolarmente soggetto a errori, così ci vorranno ulteriori testi di conferma. Per altre famiglie i benefici degli esami sono stati più netti: un bambino aveva un difetto – che sfugge ai test standard – che rende il corpo incapace di riciclare la biotina,

35

malattie genetiche possono essere rilevate da esami del sangue per neonati in molti Stati degli Stati Uniti. Nei test si cercano parti di proteine o altre molecole legate a malattie associate ai geni e che possono essere trattate.

193

malattie possono essere oggi identificate direttamente dal DNA mediante uno dei più popolari test genetici in commercio destinati ai neonati, Natalis di Sema4. Come i test standard, Natalis cerca malattie che possono essere trattate.

1514

geni, ognuno responsabile di una malattia infantile, sono stati identificati in uno studio sui neonati chiamato BabySeq. Lo studio ha cercato DNA collegato a malattie trattabili, geni che possono influire sulle risposte ai farmaci e geni che non pregiudicherebbero la salute del neonato ma potrebbero essere trasmessi e provocare malattie nelle future generazioni.

una vitamina; se non è trattata, questa condizione può provocare coma e morte, ma si cura facilmente integrando la dieta.

Sebbene inizialmente lo studio fosse centrato sui disturbi a insorgenza infantile, fra i neonati esaminati è stato individuato un caso con una variante del gene *BRCA2* associata ad alto rischio di tumori alla mammella e di altro tipo; i ricercatori hanno chiesto quindi ai genitori se volevano essere informati anche sui rischi per malattie che si presentano in età adulta. Natalie e suo marito hanno optato per non ricevere queste informazioni, dicendo che avrebbero lasciato a Russell, una volta cresciuto, la decisione se fare o meno i relativi esami. «Ci è sembrato che la decisione dovesse spettare a nostro figlio», dice Nathalie.

L'etica in gioco

Data la complessità e il costo, BabySeq non è mai stato inteso come un'aggiunta praticabile agli screening neonatali standard. «Non abbiamo cercato di sostenerne l'adozione nella pratica clinica», dice Green, del Brigham and Women's Hospital. Ma i test di sequenziamento non sono più limitati alla pratica clinica. Oggi molte aziende offrono test del DNA dei neonati direttamente ai consumatori. Sema4, per esempio, per 379 dollari vende un test che, a quanto dice l'azienda, effettua uno screening per 190 condizioni genetiche che possono colpire prima dei dieci anni di età e sono curabili con farmaci, diete o altri interventi. I risultati sono comunicati ai genitori in sedute di consulenza genetica tra le quattro e le sei settimane circa dopo il test. Il CEO di Sema4, Eric Schadt, dice che il test può individuare varianti genetiche legate a malattie con una precisione del 99 per cento. Sema4 riferisce solo i risultati relativi a malattie che hanno una penetranza – la proporzione delle persone con la variante genetica che finiscono per sviluppare la malattia – superiore all'80 per cento. Inoltre, comunica anche informazioni sulla sensibilità del bambino a determinati farmaci, anche se la Food and Drug Administration degli Stati Uniti ha esercitato pressioni sulle aziende affinché non rendano disponibili queste informazioni, dicendo di non aver esaminato i test e che potrebbero non essere sostenuti da prove cliniche.

Un'altra azienda, BabyGenes, offre un test che esamina 100 geni per più di 72 condizioni. Può essere effettuato sia su tampone della bocca sia su macchie di sangue essiccate, e costa 349 dollari.

Schadt ammette che Sema4 non sa se questo tipo di test porti a un beneficio complessivo per i pazienti, anche se dice che l'azienda sta effettuando studi per capirlo. E ci sono motivi per chiederselo. L'accuratezza di questi test nel rilevare malattie è ancora incerta. In un terzo progetto di NSIGHT, diretto da Jennifer Puck, Barbara Koenig e Pui-Yan Kwok, dell'Università della California a San Francisco (UCSF), è stato sequenziato il DNA ricavato da macchie di sangue residue dei test neonatali del tallone (la California conserva tutte quelle macchie dall'inizio degli anni ottanta). Anche se il sequenziamento ha rilevato condizioni genetiche che non vengono cercate negli esami neonatali standard, ha mancato di rilevarne alcune che gli esami standard invece individuano. E ha segnalato un gran numero di varianti geniche di significato ignoto, dice Puck: «Uno screening neonatale è ben diverso da quando hai un malato e cerchi di arrivare a una diagnosi».

Ma combinato con gli esami standard, il test del DNA è stato utile per ridurre i falsi positivi. Puck pensa che il sequenziamento potrebbe essere aggiunto agli screening quando c'è un risultato anormale, ma non crede che dovrebbe essere usato su bambini sani. «Non sappiamo interpretare la sequenza con sufficiente capacità predittiva da dire: "questa è una malattia e questa no"», dice.

Un altro motivo di preoccupazione per medici ed esperti di etica è la possibilità che i test genetici provochino nei genitori inutili ansie per malattie che potrebbero emergere più tardi nella vita o non emergere affatto. «Quando si parla di informazioni genetiche che riguardano i propri bambini, tante persone non sono in grado di capire bene che cosa significano i risultati», dice Nita Farahany, un'esperta di genetica e bioetica che insegna diritto e filosofia alla School of Law della Duke University. «Se si sentono dire che il loro bambino ha un rischio quattro volte maggiore per una condizione, ma il rischio per la popolazione generale è dell'1 per cento, come dovrebbero trattare il bambino?» Negli Stati Uniti già c'è carenza di consulenti genetici, dunque non ce ne sarebbero abbastanza per aiutare i genitori a capire i risultati dei test genetici.

E poi c'è la privacy. Se le informazioni genetiche di un bambino sono registrate da qualche parte, chi le può consultare? Se diventano pubbliche, potrebbero essere usate da datori di lavoro o compagnie assicurative per comportamenti discriminatori. Negli Stati Uniti, il Genetic Information Nondiscrimination Act, approvato nel 2008, vieta queste discriminazioni. Ma la legge non si applica

a datori di lavoro con meno di 15 dipendenti e non copre le assicurazioni per l'assistenza a lungo termine, sulla vita e per disabilità. E non si applica a dipendenti assicurati dal sistema militare Tricare, come Rylan Gorby. Quando è stato sequenziato il genoma del figlio, i ricercatori hanno sequenziato anche il genoma di Rylan, per vedere se fosse portatore di quella rara anomalia dell'emoglobina. Dato che l'anomalia si manifesta solo nell'infanzia, Rylan ha deciso di fare il test malgrado il possibile rischio di discriminazioni.

Inoltre c'è da considerare il prezzo. Per Green, del Brigham and Women's Hospital, il sequenziamento in ambito clinico costa ancora tra 500 e 800 dollari, l'interpretazione anche più di 1000. Per le famiglie che non possono permettersi un'assicurazione sanitaria, è fuori portata. Alcuni esperti sono preoccupati anche dal fatto che i test genetici possano portare a un gran numero di esami e visite specialistiche di conferma, sovraccaricando sistemi sanitari già con risorse limitate. Se si scopre che a lungo termine il sequenziamento farà risparmiare denaro, le compagnie di assicurazione potrebbero coprirlo, ma non c'è garanzia che sarà così.

Un altro problema è che finora la maggior parte dei sequenziamenti ha riguardato neonati di famiglie benestanti e bianche, suscitando preoccupazione che questa tecnica finisca per essere riservata solo ai privilegiati. E l'omogeneità razziale potrebbe deformare i risultati: le malattie più prevalenti nei bianchi potrebbero essere rappresentate in modo eccessivo nei test, mentre quelle più comuni nelle minoranze razziali potrebbero essere sottorappresentate. Ma nuovi progetti di raccolta di dati medici intendono affrontare questa disparità (*si veda l'articolo a p. 64*).

L'era del sequenziamento neonatale

Il progetto NSIGHT dell'UCSF ha incluso anche un gruppo di lavoro su alcuni aspetti etici e di politica sanitaria, che nel 2018 ha prodotto un rapporto dello Hastings Center, un centro no profit di bioetica a Garrison. Il rapporto ha concluso che il sequenziamento del DNA dei neonati ha molti vantaggi come aiuto alla diagnosi per i piccoli malati e potrebbe aumentare il numero delle condizioni che rispettano i criteri rigorosi dello screening neonatale. Ma usare il sequenziamento genomico al posto dello screening neonatale è «prematuro nella migliore delle ipotesi», dicono gli autori, e i servizi di sequenziamento proposti ai consumatori non dovrebbero essere usati a fini diagnostici o di screening.

Barbara Koenig, che insegna antropologia medica e bioetica alla UCSF, e autrice del rapporto, sottolinea che il sequenziamento è una tecnica promettente ma non ancora abbastanza matura per essere usata come screening per i bambini in salute. «Non è ancora pronta per un uso generalista sui neonati sani», dice Koenig.

Nonostante le preoccupazioni, l'era del sequenziamento dei neonati è arrivata, e probabilmente questa pratica diventerà sempre più diffusa con la progressiva diminuzione dei costi e via via che i risultati saranno più precisi e più utili. Nel frattempo, rischi e benefici andranno valutati caso per caso. Un neonato grave è diverso da un piccolo che sembra stare bene e ha genitori apprensivi e vulnerabili al marketing delle aziende che vendono test genetici.

Nel caso di Mitchell, è di certo valsa la pena sequenziare il DNA. Due mesi dopo essere uscito dall'ospedale sta bene e peso il doppio. I genitori si stanno adattando alla nuova routine, magari un po' a corto di sonno ma felici di avere in casa un bimbo in salute. ■

Tanya Lewis, *associate editor* di «Scientific American», copre sanità e medicina.

MEDICINE BASATE SUL DNA

È arrivata la terapia genica

Dopo varie false partenze, finalmente i farmaci che manipolano il codice della vita iniziano a cambiare l'esistenza delle persone

di Jim Daley

L'idea della terapia genica – un tipo di medicina basata sul DNA che inserisce nelle cellule un gene sano affinché sostituisca una variante mutata che provoca una malattia – è stata pubblicata per la prima volta nel 1972. Dopo decenni di risultati contestati, trattamenti falliti e qualche decesso nei trial clinici, il primo farmaco per la terapia genica, per un tipo di cancro della pelle, è stato approvato in Cina nel 2003. Il resto del mondo però non si è lasciato convincere facilmente; solo nel 2017 uno di questi farmaci è stato approvato dagli Stati Uniti [*Nel 2012 il primo nell'Unione Europea, N.d.R.*]. Da allora, il tasso di approvazione ha accelerato. Sono state approvate almeno nove terapie geniche, per certi tipi di cancro, alcune infezioni virali e qualche malattia ereditaria. Una classe di farmaci correlati interferisce con i geni difettosi mediante tratti di DNA o di RNA che ne ostacolano l'azione. Dopo quasi mezzo secolo, l'idea della medicina genetica è diventata realtà.

Inserzione di geni

Questi trattamenti usano un virus innocuo per portare un gene «buono» nelle cellule, dove il virus lo inserisce nel genoma, cancellando gli effetti delle mutazioni dannose di un altro gene.

GENDICINE: L'agenzia regolatrice cinese ha approvato la prima terapia genica disponibile in commercio al mondo nel 2003 per trattare il carcinoma a cellule squamose della testa e del collo, una forma di cancro della pelle. Gendicine è un virus ingegnerizzato per trasportare un gene con le istruzioni per la sintesi di una proteina che combatte il tumore. Il virus introduce il gene nelle cellule tumorali, aumentando l'espressione dei geni che sopprimono i tumori e dei fattori della risposta immunitaria. Il farmaco è ancora in attesa dell'approvazione della FDA.

GLYBERA: La prima terapia genetica approvata nell'Unione Europea curava il deficit di lipoproteina lipasi (LPLD), una rara malattia ereditaria che provoca gravi pancreatiti. Il farmaco inseriva il gene che codifica per la lipoproteina lipasi nelle cellule muscolari. Dato però che la malattia LPLD colpisce pochissimi pazienti, il farmaco non ha generato profitti, e nel 2017 il produttore non ha rinnovato l'autorizzazione alla vendita; Glybera non è più sul mercato.

IMLYGIC: Farmaco approvato in Cina, Stati Uniti e Unione Europea come trattamento per i pazienti con melanoma che presentano lesioni cutanee ricorrenti dopo un primo intervento chirurgico. È una terapia genetica modificata inserita con un vettore virale direttamente nei tumori, dove il gene si replica e produce una proteina che stimola una risposta immunitaria contro le cellule tumorali.

KYMRIAH: Sviluppato per i pazienti affetti da leucemia linfoblastica a cellule B, un tipo di cancro che colpisce i globuli bianchi in bambini e giovani adulti, Kymriah è stato approvato dalla FDA nel 2017 e nell'Unione Europea nel 2018. Funziona introducendo nelle cellule T del paziente un nuovo gene che permette alle cellule T di trovare e uccidere le cellule leucemiche.
LUXTURNA: Il farmaco è stato approvato dalla FDA nel 2017 e nell'Unione Europea nel 2018 per trattare i pazienti con una rara forma di cecità ereditaria, la distrofia retinica associata a mutazione biallelica in *RPE65*. Negli Stati Uniti la malattia colpisce 1000-2000 persone, che hanno una mutazione in entrambe le copie di un particolare gene, denominato *RPE65*. Luxturna porta una copia normale di *RPE65* alle cellule retiniche del paziente, consentendo la sintesi di una proteina necessaria per convertire la luce in segnali elettrici, e ripristinando così la visione.
STRIMVELIS: Ogni anno in Europa a 15 persone viene diagnosticata una grave immunodeficienza dovuta a una rara condizione ereditaria detta deficit di adenosina deaminasi (ADA-SCID). Nel loro corpo non viene prodotto l'enzima ADA, essenziale per la funzionalità dei globuli bianchi. Strimvelis, approvata nell'Unione Europea nel 2016, funziona inserendo il gene per la sintesi di ADA in cellule staminali prelevate dal midollo del paziente stesso; le cellule sono poi reintrodotte nel flusso sanguigno del paziente, dove sono trasportate al midollo osseo, in cui generano globuli bianchi normali in grado di produrre ADA.
YESCARTA. Sviluppato come trattamento per un tumore detto linfoma diffuso a grandi cellule B, Yescarta è stato approvato nel 2017 dalla FDA e nel 2018 nell'Unione Europea. In Cina è in fase di sperimentazione clinica. Il linfoma diffuso a grandi cellule B colpisce un tipo di globuli bianchi, i linfociti. Il trattamento, che adotta un approccio detto terapia cellulare CAR-T, usa un virus per inserire un gene che dirige la sintesi di proteine dette recettori chimerici dell'antigene (CAR) nelle cellule T del paziente. Quando queste cellule sono reintrodotte nel corpo del paziente, i CAR permettono loro di attaccare e uccidere le cellule tumorali nel sangue.
ZOLGENSMA: Nel maggio 2019 la FDA ha approvato Zolgensma per i bambini sotto i due anni con atrofia muscolare spinale, una malattia neuromuscolare che in tutto il mondo colpisce circa una persona su 10.000 ed è una delle prime cause genetiche di mortalità infantile. Zolgensma inserisce una copia sana del gene *SMN* umano nei motoneuroni dei pazienti, in unico trattamento.
ZYNTEGLO: Approvato nell'Unione Europea nel maggio 2019, Zynteglo tratta una malattia del sangue, la beta-talassemia, che riduce la capacità del paziente di produrre emoglobina, la proteina dei globuli rossi che contiene ferro, causando un'anemia che può mettere in pericolo la vita dei pazienti. La terapia è stata approvata per i pazienti di almeno 12 anni che richiedono regolari trasfusioni sanguigne, e usa un virus per introdurre copie sane del gene per l'emoglobina in cellule staminali prelevate dal paziente. Le cellule sono poi reintrodotte nel sangue e trasportate nel midollo osseo, dove generano globuli rossi normali in grado di produrre emoglobina.

Interferenza genica

In questo approccio si usa un filamento di RNA o DNA sintetico (detto oligonucleotide) che, una volta introdotto in una cellula del paziente, può legarsi a uno specifico gene o alla molecola che trasporta l'informazione dello stesso gene, bloccandone l'attività. In alcuni casi si usano sequenze antisenso (dal nome di uno dei filamenti del DNA), in altri brevi filamenti di RNA interferenti, che impediscono alle molecole che trasmettono le istruzioni del gene di raggiungere le strutture cellulari che fabbricano le proteine.

DEFITELIO: Questo farmaco contiene una miscela di oligonucleotidi a singolo filamento ricavati dalla mucosa intestinale dei maiali. Defitelio è stato approvato (con limitazioni) negli Stati Uniti e nell'Unione Europea nel 2007 per trattare casi gravi di malattia veno-occlusiva, in cui si ha l'occlusione dei vasi venosi minori del fegato in pazienti che hanno subito un trapianto di midollo osseo.
EXONDYS 51: Nel 2016 la FDA ha approvato questo farmaco, fra alcune controversie sulla sua efficacia; due dei componenti della commissione di revisione si sono dimessi per protesta contro la decisione.
La terapia punta a trattare una forma della distrofia muscolare di Duchenne causata da mutazioni nell'RNA che codifica per la sintesi di una proteina che contribuisce a connettere i citoscheletri delle fibre muscolari alla matrice circostante. Exondys 51 è efficace nel 13 per cento circa della popolazione dei pazienti con Duchenne.
KYNAMRO: Approvato dalla FDA nel 2013, il farmaco è fatto per inibire una proteina – o bloccarne, in pratica, la produzione – che contribuisce alla sintesi della lipoproteina a bassa densità (LDL). Iniettato per via sottocutanea, il farmaco è usato per abbassare i livelli di LDL in pazienti con colesterolemia pericolosamente elevata.
MACUGEN: La degenerazione maculare senile è la prima causa di perdita della visione dai sessant'anni di età in poi. Questa degenerazione causata dal deterioramento del centro della retina dovuto a perdite provenienti dai vasi sanguigni. Approvato negli Stati Uniti, il farmaco tratta questa degenerazione inibendo la crescita di questi vasi sotto la retina.
SPINRAZA: Approvato dalla FDA nel 2016, è la prima terapia genica per l'atrofia muscolare spinale. Questa malattia ereditaria è causata da bassi livelli di una proteina chiave, indicata con SMN, per il mantenimento dei motoneuroni. Spinraza si lega all'RNA proveniente da un gene «di riserva» indicato con *SMN2*, e lo converte in una forma che può trasmettere le istruzioni per sintetizzare una SMN pienamente funzionale.

Jim Daley è un giornalista freelance di Chicago.

BIG DATA

Tutti noi

Per evitare dannose forme di parzialità nella tutela della salute, un ambizioso progetto di ricerca ha come obiettivo un aumento della diversità per la medicina basata sul DNA

di Stephanie Devaney

QUANDO LA CORSA AL PRIMO SEQUENZIAMENTO DEL GENOMA UMANO era ormai prossima al traguardo, parliamo di una ventina d'anni fa, ero perdutamente affascinata da quello che stava per succedere. Era l'alba di un nuovo secolo, e sembrava fossimo sul punto di svelare il senso celato nel progetto della vita, nel DNA. All'epoca ero una studentessa universitaria, ero estasiata dalla scienza, e pensavo che una volta messi in fila i 3,1 miliardi di coppie di basi che compongono la molecola del nostro genoma avremmo capito tutto quello che c'è da sapere sulla salute e sulle malattie umane. Quello che non sapevo è che i primi decenni della medicina genetica avrebbero lasciato indietro tante persone.

Così diversi anni dopo, siamo arrivati al 2009, subito dopo aver conseguito il dottorato in genetica molecolare sono rimasta sconcertata quando ricercatori della Duke University hanno riferito che il 96 per cento dei dati genomici che avevamo raccolto proveniva da persone con ascendenza europea. E questo non era l'esito di piccoli numeri: quella percentuale era stata calcolata su oltre 1,7 milioni di campioni genomici analizzati a quel tempo, ma erano i campioni stessi a mancare di diversità. Negli anni successivi le cose non sono migliorate di molto, e ancora quattro anni fa le banche dati genomiche continuavano a essere molto sbilanciate, con una maggiore rappresentanza per gli europei e minore per chiunque altro.

Se non verrà corretta, questa disuguaglianza si tradurrà in un'enorme iniquità in termini di salute. Oggi sempre più persone trovano risposte sulle cause sottostanti alle loro malattie grazie alla capacità della medicina di scavare nei loro genomi. Centinaia di farmaci fanno riferimento a informazioni di tipo genetico nei loro foglietti illustrativi perché le varianti geniche influenzano il modo in cui il corpo metabolizza quei farmaci, e sapere quali varianti ha un paziente serve ai medici per stabilire la dose più adatta. Ancora, le maggiori conoscenze che abbiamo oggi sulle basi genetiche di diverse forme di cancro stanno pagando in termini di diagnosi e terapie per molti tumori. Tuttavia chi non è bianco, e chi non è maschio, ha set di geni diversi, che non sempre rispondono a questi regimi di trattamento.

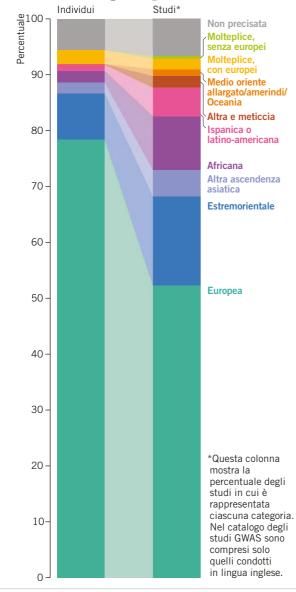
Per esempio, negli Stati Uniti afroamericani e *latinos* hanno i tassi più alti di asma, ma gli studi rivelano che i farmaci comuni usati negli inalatori non li aiutano così bene quanto aiutano i bianchi. Gli asiatici che assumono carbamazepina, un farmaco anticonvulsivo, corrono un rischio più elevato di reazioni gravi, a volte fatali. Quando sono stati sviluppati questi farmaci, o quando si è cominciato a prescriverli, nessuno aveva previsto questo tipo di problemi. Se il DNA è un fattore importante nella ricerca di trattamenti medici più efficaci, dobbiamo affrontare l'insufficiente diversità dei dati genetici.

È qui che spera di essere utile All of Us, programma di ricerca di cui faccio parte. È stato istituito dai National Institutes of Health e lanciato nel 2018, e chiediamo a un milione di persone, o anche di più, di ogni provenienza etnica di unirsi a noi come partner di ricerca, non come cavie umane, e di condividere informazioni sanitarie di ogni genere lungo il corso della propria vita. Abbiamo già oltre 250.000 partecipanti, di cui più del 51 per cento appartiene a minoranze razziali o etniche, oltre il 10 per cento a minoranze sessuali o di genere, e nel complesso più dell'80 per cento fa parte di

DATI SBILANCIATI

Studi genetici di parte

Per collegare i geni ai rischi di malattia e ad altri tratti, centinaia di studi di associazione estesi all'intero genoma (GWAS) hanno esaminato il DNA di migliaia di persone diverse (al 2018). Ma in termini di origine razziale queste persone non sono poi così diverse. Considerando tutti i progetti, il 78 per cento dei soggetti coinvolti sono europei bianchi, mentre gli africani sono solo il 2 per cento e gli ispanici o latino-americani l'1 per cento. Inoltre gli studi stessi sono focalizzati prevalentemente sugli europei, solo di rado su altre popolazioni. Dunque le varianti geniche che appaiono fra i non europei e che potrebbero essere legate a malattie emergono raramente in queste ricerche, rendendo difficile analizzare e capire l'importanza di queste varianti.

Fonte: *The Missing Diversity in Human Genetic Studies*, di Giorgio Sirugo e altri, in «Cell», Vol. 177, 21 marzo 2019

un gruppo che storicamente è rimasto sottorappresentato nei dati raccolti dalle ricerche.

Si può aderire al programma tramite il suo sito web (www.joinallofus.org) e facendo click sul pulsante «Join Now». Dopo aver accettato di partecipare, è possibile mettere a nostra disposizione cartelle cliniche, rispondere a questionari su salute e stile di vita e prendere parte ad altre attività, per esempio sincronizzando i propri dispositivi di tracciamento dell'attività fisica con il nostro programma. Inoltre abbiamo centinaia di punti di reclutamento in ospedali e centri medici distribuiti in tutti gli Stati Uniti, dove i partecipanti possono portare campioni di sangue e urina per aiutare i ricercatori a studiare il loro DNA. La nostra speranza è che le persone restino con noi per almeno dieci anni, perché via via che il programma cresce aggiungeremo nuove possibilità affinché possano saperne di più su se stesse e contribuire alla ricerca.

È il momento giusto

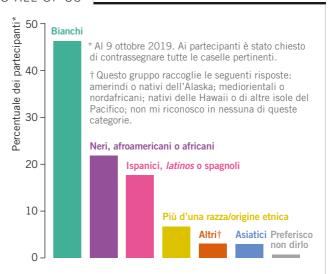
Una grossa parte di questa collaborazione tra partecipanti e ricercatori è legata ai progressi della tecnologia. Per sequenziare il primo genoma umano c'è voluto un miliardo di dollari. Oggi un sequenziamento costa meno di 1000 dollari e può richiedere anche meno di 24 ore. Ed è più facile integrare queste informazioni con altri dati medici cruciali. Da tempo ormai istituzioni e organismi sanitari stanno convertendo le cartelle cliniche cartacee dei propri pazienti in forma elettronica. Al 2017, il 96 per cento di tutti gli ospedali degli Stati Uniti e l'80 per cento di tutti i medici privati usava un sistema elettronico certificato di registrazione dei dati. Nuove *app* per *smartphone* e altri dispositivi digitali come gli *smartwatch* registrano dati da quasi ogni luogo e direttamente dalle singole persone. Tutte queste tendenze facilitano archiviazione, condivisione e sfruttamento di grandi insiemi di dati per rispondere a domande su cause ed effetti delle malattie. E sollevano anche grosse e inquietanti questioni di privacy, motivo per cui per i progetti come il nostro sono importanti sia una forte sicurezza sia la piena trasparenza nei confronti dei partecipanti.

E cruciale è trattare queste persone come partner. Il comportamento passato dei ricercatori in campo medico ha provocato forti diffidenze nelle comunità delle minoranze, con il male fatto nello studio Tuskegee sulla sifilide, in cui alcuni scienziati hanno ingannato volontari afroamericani maschi affetti da sifilide e non li hanno mai curati in modo adeguato, o con il diffuso uso delle cellule HeLa, prelevate da una paziente di nome Henrietta Lacks senza informarla e senza il suo consenso. Le persone vorrebbero vedere che la ricerca scientifica procede con loro, non su di loro. Per superare questo tipo di diffidenze, il programma All of Us sta adottando un nuovo modello di ricerca, in cui si richiede il contributo dei partecipanti oltre che di scienziati con titoli adeguati. Ci sono partecipanti nei comitati consultivi e direttivi del programma, nei gruppi di lavoro e nelle unità operative. Inoltre, abbiamo come partner organizzazioni sanitarie, ospedali e comitati locali, che fanno da consulenti e ci aiutano a trovare persone interessate. Il coinvolgimento delle comunità non è un terreno familiare per i grandi progetti di ricerca medica, e stiamo ancora imparando come farlo bene.

Alcuni studi ci hanno offerto un modello per sviluppare rapporti a lungo termine come quelli che speriamo di costruire, studi che hanno cambiato in meglio la medicina. Per esempio il Framingham Heart Study, iniziato nel 1948 con 5209 uomini e donne, in gran parte bianchi, di una cittadina del Massachusetts. Con un

Un miglior equilibrio

Un nuovo progetto di medicina di precisione, All of Us, comprende popolazioni assai più ampie di gruppi storicamente sottorappresentati nella ricerca genetica. Il progetto, sponsorizzato dai National Institutes of Health degli Stati Uniti, ha cominciato a reclutare i partecipanti nel 2018. A ottobre 2019 avevano aderito oltre 250.000 soggetti: poco più del 20 per cento sono neri, afroamericani o africani. Circa il 18 per cento sono *latinos*, ispanici o spagnoli. Quasi il 3 per cento sono asiatici e il 6,7 per cento di gruppi etnici misti. Poco meno della metà dell'intero gruppo è costituito da bianchi. L'obiettivo del progetto è raccogliere dati sul DNA e informazioni sanitarie da oltre un milione di persone.

Grafica di Amanda Montañez; fonte: National Institutes of Health, All of Us Research Hub, 9 ottobre 2019

tasso di mantenimento del 99 per cento, lo studio è ancora in corso. Anno dopo anno i partecipanti condividono i propri dati, e in questo modo i ricercatori possono vedere come cambiano le condizioni del cuore dei partecipanti nel tempo. I fattori di rischio cardiaco identificati nel Framingham Heart Study – alta pressione sanguigna, colesterolo elevato, fumo e obesità – sono ormai tanto radicati nella coscienza collettiva e nel nostro approccio alla cura della salute che sembrano quasi dati dal senso comune.

Ancora più avanti

Questo tipo di scoperte mediche è quello che immaginiamo per il programma All of Us, ma vogliamo spingerci oltre, con partecipanti non più solo bianchi e che anzi rappresentino le diversità in molte dimensioni, non solo le tradizionali etichette razziali, che in realtà al loro interno includono origini diverse. Se vogliamo arrivare alle cause che sono alla radice di salute e malattia, dobbiamo capire differenze e somiglianze che esistono fra tutti noi. Per esempio, l'anemia a cellule falciformi si verifica quando una persona eredita due copie mutate del gene che codifica per l'emoglobina, la proteina che trasporta l'ossigeno nel sangue, e colpisce 100.000 afroamericani e oltre 20 milioni di persone in tutto il mondo. Al contrario, il «tratto falciforme» – in cui una sola copia del gene è mutata – in realtà dà un vantaggio alle persone quando si tratta di sopravvivere alla malaria, il che ha senso dal punto di vista evolutivo se i vostri antenati provengono da aree come l'Africa, in cui la malaria è fortemente prevalente.

Nuovi studi hanno però trovato che questo tratto non è così benigno come credevano i medici, perché potrebbe far aumentare il rischio di malattie renali. Alcuni afroamericani sono più suscettibili a questo rischio, altri meno. Chiaramente dobbiamo capirne ancora di più sul perché questo potrebbe avvenire e in che modo le diverse varianti del DNA potrebbero interagire con e influenzare le condizioni di salute delle persone con il tratto falciforme. Le informazioni sul DNA di più di un milione di partecipanti a All of Us potrebbero permettere ai ricercatori di scoprire molto di più su tratti complessi come questo.

Dobbiamo comunque partire con alcune categorie più generalizzate per reclutare un numero di persone sufficiente affinché comincino a emergere le distinzioni più sottili fra i gruppi che esistono in quelle stesse categorie. Attualmente stiamo superando l'obiettivo di avere un eccesso di rappresentanti dei gruppi storicamente sottorappresentati nelle ricerche. Per esempio, gli afroamericani costituiscono circa il 13 per cento della popolazione degli Stati Uniti, ma solo il 3 per cento dei campioni fin qui considerati negli studi di genomica. Finora il 21 per cento dei partecipanti ad All of Us sono afroamericani. Analogamente, gli ispanici sono il 18 per cento della popolazione degli Stati Uniti ma nel 2016 rappresentavano solo l'1 per cento dei dati delle nostre banche dati genomiche. Oggi il 17,6 per cento dei partecipanti a All of Us sono proprio ispanici.

Questo livello di diversità ci aiuterà a fare nuove scoperte su come il DNA agisce sulle condizioni di salute delle varie comunità; ma non ci concentreremo solo su questa molecola. Nelle malattie entrano in gioco molti altri fattori, oltre ai geni. Sappiamo che il luogo dove si nasce, quello che si mangia, gli stress subiti e altri fattori clinici e biologici influiscono sulla salute, ma ancora non capiamo bene quanto. Per esempio, molte delle più diffuse malattie croniche che affiggono la nostra popolazione – per esempio l'ipertensione – colpiscono in misura sproporzionata le persone più svantaggiate, in termini sociali ed economici, del nostro paese. E da quello che possiamo dire al momento i determinanti non sono solo legati all'origine etnica. I rischi includono anche struttura familiare, condizioni socioeconomiche, elementi di stress come i traumi, diseguaglianze legate a sesso e genere, disponibilità di cibi con alto valore nutritivo, accesso a cure sanitarie e molti altri fattori; tutte cose che potremo cogliere dai dati raccolti nel progetto All of Us.

Nei prossimi anni dovremmo essere in grado di confrontare questo ricco insieme di informazioni con il DNA dei partecipanti. Quando ci arriveremo, gli scienziati come me, i partecipanti ad All of Us e tutti gli altri, cominceranno a farsi un quadro più chiaro del ruolo che svolgono biologia e ambiente nello sviluppo delle malattie, e soprattutto di quello che possiamo fare in merito. ■

La genetista molecolare **Stephanie Devaney** è vice direttrice del programma di ricerca All of Us dei National Institutes of Health degli Stati Uniti. È stata *staff lead* della Precision Medicine Initiative della Casa Bianca.

In dirittura d'arrivo.
Racchiusa da un tubo d'acciaio inossidabile e circondata di rocce intrise d'acqua, una delle due camere a vuoto lunghe tre chilometri corre in un umido tunnel sgocciolante scavato sotto il monte Ikenoyama, in Giappone. Dentro le camere a vuoto c'è un intricato sistema di laser e specchi, fatto per sintonizzarsi sulle onde gravitazionali che provengono dalle profondità del cosmo e attraversano il nostro pianeta.

Enrico Sacchetti (*tutto il servizio*)

Centro di gravità

Costruito in Giappone, KAGRA è il primo grande rivelatore di onde gravitazionali costruito sottoterra, e si prepara a entrare in funzione

di Lee Billings

Le onde gravitazionali, increspature dello spazio-tempo prodotte da fusioni di buchi neri, collisioni di stelle di neutroni, esplosioni di supernove e altri cataclismi cosmici, hanno innescato una rivoluzione nel campo dell'astrofisica. Previsti da Albert Einstein e osservati per la prima volta dopo un secolo, nel 2015, questi elusivi sussurri nel tessuto della realtà stanno già rivelando dettagli altrimenti invisibili degli esotici oggetti che li generano.

Leo Billings, *senior editor*
di «Scientific American»,
si occupa di spazio e fisica.

Lo studio delle onde gravitazionali ha dato la prima prova diretta dell'esistenza dei buchi neri, ha prodotto nuove stime del tasso di espansione del cosmo e ha mostrato che le stelle di neutroni sono la fonte principale delle riserve d'oro, platino e altri elementi pesanti dell'universo. E potrebbe permettere di dare un'occhiata al cosmo com'era nelle prime frazioni di secondo dopo il big bang.

Il fronte avanzato di questo promettente futuro si trova in un complesso sotterraneo con tunnel immersi nel buio. Più di 200 metri sotto il Monte Ikenoyama, nella prefettura di Gifu, nel Giappone centrale, un gruppo internazionale di scienziati, ingegneri e tecnici sta finendo di mettere a punto, dopo quasi un decennio di lavoro ininterrotto, il Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA), affinché entri in funzione alla fine del 2019 [*L'entrata in funzione è stata poi posticipata per motivi tecnici, n.d.r*]. Presto KAGRA si unirà agli altri tre rivelatori di onde gravitazionali attivi nel mondo: le due stazioni gemelle dell'Advanced Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory (LIGO) negli Stati Uniti, costruite a Hanford, nello Stato di Washington, e a Livingston, in Louisiana, e l'Advanced Virgo nei pressi di Pisa, in Italia. La posizione di KAGRA, in Giappone, e il suo orientamento rispetto a LIGO e Virgo, permetteranno un controllo indipendente e un miglioramento delle osservazioni degli altri rivelatori, così i ricercatori potranno misurare meglio orientamento e rotazione di buchi neri e stelle di neutroni in via di fusione.

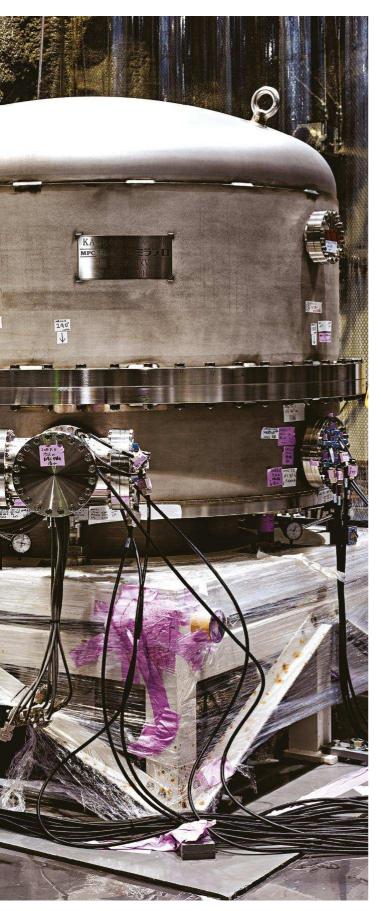
Tutti insieme questi quattro rivelatori raggiungeranno nuovi livelli di sensibilità e precisione, e potranno registrare eventi di onde gravitazionali deboli come mai prima, individuandone le coordinate con una precisione senza precedenti per poterli poi seguire con i telescopi convenzionali.

Per rilevare le onde gravitazionali, KAGRA usa lo stesso metodo di LIGO e Virgo, l'interferometria laser. Nel rivelatore giapponese un fascio laser viene riflesso avanti e indietro tra due specchi sospesi agli estremi di due camere a vuoto a forma di tubo, lunghe vari chilometri e orientate perpendicolarmente fra loro a formare una gigantesca L. Il laser funziona come un righello, rivelando il momento in cui il passaggio di un'onda gravitazionale fa allungare e accorciare per un brevissimo istante lo spazio-tempo, alterando la lunghezza delle due camere (e quindi la distanza totale percor-

IN BREVE

Grazie a tre osservatori, lo studio delle onde gravitazionali sta rivoluzionando la nostra comprensione di buchi neri, stelle di neutroni e altri oggetti astrofisici.

Un quarto strumento, il Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA), è pronto per entrare in funzione.

KAGRA è il primo strumento del suo genere costruito sottoterra e tenuto a temperatura estremamente bassa per aumentare la sensibilità, e dimostra innovazioni cruciali per la prossima e ancora più avanzata generazione di rivelatori.

Scudo anti-vibrazioni.
Un tecnico accanto alla sezione superiore del sistema alto 14 metri che isola dalle vibrazioni uno degli specchi di zaffiro levigato di KAGRA. Questi sistemi sono necessari per schermare i rumori esterni e permettere il rilevamento dei minuscoli segnali – spostamenti degli specchi di meno di un millesimo del diametro di un protone – che indicano il passaggio delle onde gravitazionali.

sa da ciascuno dei fasci di luce). Sono perturbazioni inconcepibilmente piccole, assai inferiori al diametro di un solo protone; il che vuol dire che tutti gli osservatori devono in qualche modo sopprimere, o tenerne conto, un assortimento pressoché innumerevole di rumori contaminanti, dagli enormi movimenti sismici dei terremoti e delle maree alle più deboli vibrazioni provocate da aerei o auto di passaggio, dagli animali selvatici nelle vicinanze e dalle vibrazioni stesse degli atomi degli specchi. Distinguere i veri segnali causati da onde gravitazionali da quelli spuri dovuti al rumore è un compito quasi impossibile; anche per questo, insieme alle decine di eventi reali finora rilevati e annunciati in collaborazione da LIGO e Virgo, vi sono stati numerosi falsi allarmi.

Sepolto in profondità sotto la montagna, KAGRA sarà il primo grande interferometro laser costruito e fatto funzionare interamente sottoterra, lontano dalla cacofonia dei rumori di fondo della superficie terrestre. Sarà anche il primo ad avvalersi di specchi raffreddati per via criogenica – cilindri di zaffiro cristallino levigato del peso di 23 chilogrammi ciascuno – riducendo in modo spettacolare le vibrazioni termiche, con un corrispondente forte incremento della sensibilità. Gli specchi di LIGO e Virgo funzionano a temperatura ambiente; quelli di KAGRA saranno mantenuti ad appena 20 gradi sopra lo zero assoluto.

In linea di principio questi due miglioramenti dovrebbero permettere a KAGRA di trovare sorgenti di onde gravitazionali più deboli rispetto a LIGO o Virgo, tuttavia non sono privi di controindicazioni: i refrigeratori meccanici mantengono freddi gli specchi investiti dai laser ma introducono a loro volta il proprio rumore vibrazionale, mentre l'acqua proveniente dalle piogge e dallo scioglimento della neve si infiltra costantemente nei tunnel del rivelatore giapponese, il che rende necessario coprire le delicate apparecchiature con fogli di plastica. Ma anche con le protezioni nei periodi più piovosi dell'anno l'umidità potrebbe far fermare le operazioni.

Se tutto va secondo i piani, KAGRA non solo contribuirà a nuove scoperte ma servirà anche a dimostrare le nuove tecnologie che probabilmente saranno usate in tutto il mondo per la prossima generazione di rivelatori di onde gravitazionali avanzati. ■

PER APPROFONDIRE

The Detection of Gravitational Waves with LIGO. Barish B.C. Presentato al congresso dell'American Physical Society Division of Particles and Fields, Los Angeles, California, 5-9 gennaio 1999. Preprint disponibile alla pagina web: **https://arxiv.org/abs/gr-qc/9905026.**

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. LIGO Scientific Collaboration e Virgo Collaboration, in «Physical Review Letters», Vol. 116, n. 6, articolo n. 061102, 12 febbraio 2016.

KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector. The KAGRA Collaboration, in «Nature Astronomy», Vol. 3, pp. 35-40, gennaio 2019.

Il futuro dell'astronomia a onde gravitazionali. Billings L., www.lescienze.it, 20 febbraio 2016.

Fotografie di Tim Flach

La forza sorprendente della mente aviaria

Alcune specie di uccelli usano strumenti e si riconoscono allo specchio. Come fanno cervelli così piccoli ad avere prestazioni così grandi?

di Onur Güntürkün

IN BREVE

Corvidi, pappagalli e altri gruppi di uccelli mostrano una cognizione complessa, che include ragionamento causale, flessibilità mentale, pianificazione, cognizione sociale e immaginazione.

Queste abilità cognitive sono state una sorpresa per molti ricercatori. Non ci si aspettava di vederle negli uccelli a causa delle dimensioni ridotte del loro cervello e dell'assenza di corteccia cerebrale.

Gli uccelli compensano le dimensioni ridotte del cervello con una densità di neuroni molto più elevata. In modo indipendente gli uni dagli altri, uccelli e mammiferi hanno sviluppato reti neurali e aree cerebrali simili a servizio di varie funzioni cognitive.

Onur Güntürkün è professore di biopsicologia all'Università della Ruhr a Bochum, in Germania. La sua ricerca riguarda cognizione e neuroscienze in piccioni, esseri umani e altri animali.

In un laboratorio dell'Università della Ruhr a Bochum, in Germania, i miei colleghi e io abbiamo tirato fuori Gerti, una gazza eurasiatica, dalla sua gabbia, le abbiamo coperto la testa con uno straccio e le abbiamo attaccato un adesivo giallo sulle piume nere che le ricoprono la gola, dove non poteva vederlo. Poi l'abbiamo messa in un'altra gabbia per test, dove c'era anche un grande specchio, e l'abbiamo lasciata da sola, andando nella stanza accanto per osservarla da un monitor. Gerti ha guardato lo specchio e subito ha cercato con forza di togliersi l'adesivo, grattandosi la gola o sfregandosi sul pavimento.

Quando ci è riuscita, ha guardato un'ultima volta lo specchio per calmarsi. Questo comportamento nelle scimmie è considerato una prova del fatto che l'individuo riconosce se stesso, e prima di allora non era mai stato osservato negli uccelli.

Quel giorno, nel 2006, eravamo tutti su di giri, ma c'era una domanda evidente che non potevamo evitare: e se ci fossimo sbagliati? Gerti non poteva forse essersi tolta il contrassegno semplicemente perché sentiva di avere qualcosa sulla gola? Con il gruppo di ricerca a Bochum, che oltre a me includeva Helmut Prior e Ariane Schwarz, abbiamo fatto altri test sulla gazza nelle stesse condizioni, con l'unica differenza che l'adesivo era nero, e quindi quasi invisibile sulle sue piume. In un altro test con condizioni di controllo diverse le abbiamo attaccato un adesivo giallo ma non le abbiamo messo a disposizione lo specchio. In tutti questi casi, Gerti non cercava di togliersi il contrassegno.

Il comportamento di rimozione dell'adesivo si verificava solo quando l'uccello poteva osservare un segno evidente sulle proprie piume mentre si guardava allo specchio. Dato che diverse altre gazze che abbiamo testato si comportavano in modo simile a Gerti, con Prior e Schwarz abbiamo concluso che le gazze eurasiatiche sembravano capire che quello che vedevano nello specchio era il loro riflesso.

All'epoca dell'esperimento, a parte gli esseri umani, avevano dato simili prove del riconoscimento di sé solo pochi mammiferi dotati di cervelli di grandi dimensioni, come scimpanzé, orangutan, elefanti indiani e tursiopi. La capacità delle gazze di riconoscersi allo specchio è solo uno dei tanti aspetti di cognizione complessa dimostrati recentemente in corvidi e pappagalli. Queste nuove scoperte fanno vacillare la teoria dominante da secoli secondo la quale per queste capacità sarebbe necessaria una corteccia cerebrale (ovvero lo strato più esterno del prosencefalo) di grandi dimensioni e, dato che non dispongono di corteccia cerebrale, gli uccelli non dovrebbero avere buoni risultati nel riconoscere se stessi o in altri test cognitivi. Le ricerche sull'intelligenza aviaria effettuate negli ultimi vent'anni indicano che nel corso di centinaia di milioni di anni la fisiologia cerebrale estremamente diversa di uccelli ed esseri umani può aver dato origine a facoltà cognitive sorprendentemente simili, che formano la base dell'apprendimento di alto livello, dell'autocoscienza e della capacità di prendere decisioni.

Varietà dell'evoluzione cognitiva

Per capire perché i biologi ritenessero che gli uccelli non avessero queste capacità, dobbiamo risalire al laboratorio di neuroanatomia di Ludwig Edinger alla Goethe-Universität di Francoforte alla fine del XIX secolo. Questo professore, che visse tra il 1855 e il 1918, dedicò tutta la sua carriera scientifica a spiegare come si erano evoluti i cervelli e le menti dei vertebrati. Era convinto che l'evoluzione si dipanasse un passo alla volta, dalle forme primitive a quelle complesse, progredendo dai pesci agli anfibi, ai rettili, agli uccelli e ai mammiferi. Edinger scoprì che le componenti più basilari del cervello erano sempre esistite nei vertebrati.

Invece una grande area del cervello chiamata telencefalo sembrava aver subito considerevoli cambiamenti evolutivi che forse erano la causa dell'ampliamento delle abilità cognitive. Il telencefalo è composto da due parti principali: lo strato più esterno detto pallio (dal latino *pallium*, che significa «mantello») e il sottostante subpallio. Nei mammiferi il pallio è composto principalmente dai sei strati della corteccia cerebrale, la sede principale della cognizione umana, ma include anche strutture più piccole come l'amigdala e l'ippocampo; invece il subpallio sembra una massa omogenea di neuroni che archivia e in seguito attiva gli schemi di movimento appresi. Negli uccelli la situazione è radicalmente diversa: in base allo schema anatomico definito da Edinger, si osserva che il pallio è molto simile al subpallio, quindi il professore considerò erroneamente gran parte del primo come parte del secondo. Così giunse alla conclusione che gli uccelli avessero un subpallio enorme e un pallio molto piccolo e che dunque le loro abilità cognitive dovessero essere estremamente limitate.

Che errore madornale! Edinger era uno scienziato eminente all'epoca, e la sua teoria sembrava spiegare in modo convincente il motivo per cui noi mammiferi abbiamo ottime prestazioni cogni-

Una gazza eurasiatica studia la propria immagine nella simulazione di un esperimento sul riconoscimento di sé.

tive, così la sua visione, per quanto erronea, è rimasta in auge per oltre un centinaio di anni e ha influenzato profondamente il pensiero nella neuroscienza fino agli albori del XXI secolo.

C'era anche un altro motivo per considerare inferiore il cervello aviario. Il cervello dei mammiferi e quello degli uccelli differiscono anche in termini di dimensioni: quello degli struzzi, che è il più grande tra i cervelli aviari, pesa 25 grammi; per contro, il cervello di uno scimpanzé pesa circa 400 grammi, quello di un essere umano 1300 grammi e quello di un capodoglio addirittura 9000 grammi. Almeno tra i primati, le dimensioni del cervello sono correlate alle abilità cognitive. Di conseguenza, a causa sia della mancanza di un pallio corticale di grandi dimensioni sia del fatto che hanno cervelli piccoli, si pensava che gli uccelli disponessero di abilità cognitive estremamente limitate. Ma allora come è possibile che la gazza Gerti sia riuscita a superare il test del contrassegno e dello specchio, surclassando gran parte dei mammiferi dotati di cervelli grandi? O gli uccelli sono poco intelligenti, oppure c'è qualcosa di sbagliato nella visione secolare secondo cui per la cognizione è necessaria una grande corteccia cerebrale.

I corvi della Nuova Caledonia

Si ritrova un po' di prospettiva guardando i corvi della Nuova Caledonia, nel sud del Pacifico, i quali si nutrono principalmente di larve che estraggono da crepe nella corteccia degli alberi. Nel 1996 Gavin Hunt, all'epoca alla Massey University, in Nuova Zelanda, ha scritto che questi uccelli per catturare le loro prede costruiscono due tipi di strumenti, con un processo di produzione così complesso che il ricercatore lo paragonava alla produzione di utensili in pietra da parte degli esseri umani nel Paleolitico medio, tra 300.000 e 40.000 anni fa.

Molte specie animali sembrano capaci di usare strumenti, ma se mettiamo alla prova i loro comportamenti in modo corretto scopriamo che sono basati principalmente su sequenze programmate di risposte innate, non su una valutazione cognitiva di un problema. Alex H. Taylor, dell'Università di Auckland, in Nuova Zelanda, e Russell Gray, del Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte di Jena, hanno avviato studi per comprendere fino in fondo la base mentale dell'uso di strumenti nei corvi della Nuova Caledonia. I loro esperimenti hanno dimostrato che quegli uccelli sono in grado di risolvere problemi diversi ragionando sulle relazioni causali sottostanti, pianificano il futuro usando rappresentazioni mentali di oggetti che non vedono e traggono conclusioni a proposito delle relazioni di causa ed effetto tra gli eventi osservati.

Invece la loro comprensione della fisica ha qualche limite. Anche se deducono il peso degli oggetti dal modo in cui questi si muovono nel vento, a volte non riescono a capire che gli oggetti pesanti hanno un impatto maggiore sulla superficie su cui cadono. In generale i corvi della Nuova Caledonia mostrano una bravura eccezionale in molti aspetti della cognizione fisica, ma non in tutti.

E per quel che riguarda la cognizione sociale? I corvi sono capaci di lavorare in squadra, ma non capiscono che i loro compagni possono collaborare nello svolgere un compito e diventare in effetti uno «strumento sociale» che permette di raggiungere meglio un obiettivo. Guardano come gli altri uccelli manipolano gli oggetti, ma se devono capire le sequenze di azioni rilevanti si perdono dettagli cruciali. Sembra invece che visualizzino il funzionamento di uno strumento e poi lo ricreino a ritroso a partire dalla propria memoria, invece di imparare a usarlo direttamente dagli altri. Sebbene abbiano evoluto una cognizione fisica straordinaria, non si può dire che questi uccelli abbiano fatto altrettanto con le attività mentali legate alle interazioni sociali. Questo limite è specifico dei corvi della Nuova Caledonia o si applica anche ad altri uccelli? Una risposta viene da un'analisi dei corvi imperiali.

La politica dei corvi imperiali

Tra i corvi imperiali, gli esemplari giovani che non hanno un compagno o un territorio formano gruppi temporanei che si radunano dove si trovano risorse alimentari consistenti, per esempio una carcassa animale. Quando un grande predatore difende le proprie scorte alimentari, i corvi chiamano altri componenti

Uccelli cervelloni

Inizialmente le dimensioni ridotte del cervello degli uccelli avevano fatto credere ai neuroanatomisti che non potessero essere molto intelligenti. Però questa visione ha perso credito. Negli uccelli l'evoluzione ha prodotto una struttura neurale diversa, che spesso porta a mezzi simili per il controllo della cognizione.

Una visione in cambiamento

Fino al 2004 si riteneva che nella parte anteriore del cervello degli uccelli, il telencefalo, la zona assegnata al pallio, che è coinvolto nella cognizione complessa, fosse piccola. Nella visione rivista, essa occupa un'area che in termini di dimensioni relative è equivalente a quella del pallio nel cervello del macaco.

Funzioni simili, posizioni diverse

Il cervello degli uccelli è dotato di centri per l'elaborazione sensoriale e cognitiva grosso modo equivalenti a quelli dei primati. La posizione di questi centri, invece, può essere diversa. Per esempio il nidopallio caudolaterale (NCL) sul retro del cervello funziona come un centro integrato per i sistemi sensoriale, limbico e motorio dell'animale, similmente a quanto avviene con la corteccia prefrontale nei primati.

Illustrazione di Mesa Schumacher; Grafico di MSJONESNYC

Cervelli animali a confronto

Come fanno gli uccelli a ottenere prestazioni cognitive notevoli? Un vantaggio che hanno consiste in un numero di neuroni maggiore di quello previsto per gli animali delle loro dimensioni, ma rimane comunque un distacco tra il numero di neuroni di uccelli e mammiferi. Invece si è scoperto che i segnali che viaggiano nel cervello degli uccelli hanno una distanza minore da coprire, perché i neuroni sono ammassati, quindi una velocità di trasmissione più alta potrebbe compensare il numero inferiore di neuroni.

Ordinati per peso del cervello (in grammi)

Più pesante

1 Elefante africano 4700 g — 5593

2 Essere umano 1300 g — 16.340

3 Maiale 65 g — 307

4 Struzzo 25 g — 317

5 Corvo imperiale 14 g — 1204

6 Marmosetta 7,8 g — 245

7 Gazza 5,4 g — 443

8 Ghiandaia 4,6 g — 529

9 Pollo 3,2 g — 124

10 Piccione 2,1 g — 80

11 Ratto 1,8 g — 31

12 Diamantino 0,5 g — 55

Più leggero

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Meno ← Ordinati per numero di neuroni nel pallio (in milioni) → Più

Il grafico mostra una serie di animali per confrontarne le dimensioni e il numero di neuroni

Dimensione del cerchio azzurro = numero effettivo di neuroni nel pallio

del gruppo affinché mettano in atto tattiche diversive in modo da poter avere accesso al cibo. Per prevenire i furti applicano anche strategie subdole mirate a impedire ad altri uccelli di osservare le loro riserve alimentari. A loro volta i corvi osservano gli altri uccelli per derubarli di eventuali scorte lasciate incustodite. Anche le coppie formate a scopo riproduttivo difendono il proprio territorio dagli altri corvi. In questi scontri le coppie e i singoli con reti sociali ben sviluppate hanno possibilità considerevolmente maggiori di vincere e di mettere in salvo le proprie riserve alimentari. Thomas Bugnyar, dell'Università di Vienna, e Bernd Heinrich, dell'Università del Vermont, negli Stati Uniti, assieme ai loro collaboratori, sono stati tra i principali autori delle ricerche che hanno dimostrato la presenza di queste strategie sociali estremamente sviluppate nei corvi imperiali.

Un prerequisito per tutte le attività di questo genere è la capacità di intuire le reti a cui appartengono gli altri uccelli e le intenzioni degli esemplari che si incontrano negli spostamenti quotidiani. I corvi imperiali stanno attenti ai richiami che indicano un possibile cambiamento nella gerarchia di dominanza e usano la propria conoscenza delle reti sociali quando sono attaccati da un esemplare dominante. Se hanno parenti nelle vicinanze, cercano di avvertirli con ripetuti segnali vocali di pericolo, mentre rimangono più silenziosi se è vicino il compagno dell'uccello che li sta attaccando. Dato che il grado nella gerarchia di dominanza aumenta dopo un legame, i corvi tengono presenti i legami degli altri e intervengono aggressivamente per impedire la formazione di coppie. Così è probabile che impediscano agli altri di formare nuovi legami ed evitino che i loro concorrenti salgano nella scala gerarchica.

La competenza sociale serve anche in altri contesti. Il corvo presta attenzione per capire quando è osservato e quando un altro uccello può aver scoperto la sua scorta alimentare. I corvi imperiali sembrano capire quello che gli altri possono o non possono vedere e sembrano capaci persino di valutare il livello di conoscenza di un altro esemplare, un attributo di quella che è chiamata teoria della mente. Se necessario, ingannano i potenziali ladri conducendoli verso luoghi vuoti dove fingono di aver nascosto una riserva di cibo.

A complemento di queste abilità sociali, i corvi imperiali hanno un alto grado di autocontrollo e capiscono chiaramente, nel rapporto con altri animali, quando devono usare la forza e quando invece è meglio tirarsi indietro. Can Kabadayi e Mathias Osvath, entrambi dell'Università di Lund, in Svezia, hanno dimostrato che sono capaci di prepararsi per diversi tipi di eventi futuri. Dovendo scegliere tra uno strumento, per esempio una pietra, e una ricompensa immediata ma piccola, preferiscono lo strumento, con cui il giorno successivo possono ottenere una ricompensa maggiore, barattandolo o usandolo per ottenere direttamente un vantaggio. Insomma, i corvi imperiali uniscono tutti gli aspetti della cognizione complessa in un cervello di appena 14 grammi.

Pappagalli e piccioni

I corvi imperiali e quelli della Nuova Caledonia sono solo due esempi di specie di corvidi con buone capacità cognitive. In vent'anni di ricerca, Nicola Clayton, dell'Università di Cambridge, ha dimostrato che la ghiandaia della Florida eccelle in tutti gli aspetti della cognizione complessa, ed è anche il primo animale, a parte gli esseri umani, in cui sia stata dimostrata la memoria episodica, quella che permette a un animale di ricordare gli eventi passati e di immaginare le attività future.

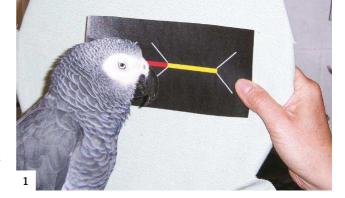
Alcune specie di pappagallo, in effetti, possono avere presta-

zioni pari a quelle dei primati non umani. Pensiamo al leggendario pappagallo cenerino Alex: Irene Pepperberg, della Harvard University, che è stata una pioniera degli studi sulla cognizione in pappagalli e corvidi assieme a Clayton, ha dimostrato la capacità dell'animale di categorizzare vari oggetti, azioni e quantità numeriche fino a otto. I ricercatori hanno confermato anche che Alex era in grado di comprendere il concetto di dimensione relativa, che sapeva notare l'assenza di un oggetto e che era capace di rilevare somiglianze e differenze negli attributi individuali di un oggetto. Era addirittura in grado di effettuare addizioni semplici applicando un concetto simile allo zero negli esercizi numerici.

Per quanto notevoli siano questi studi, i primatologi hanno sollevato il dubbio che questi uccelli siano intelligenti solo per pochi ambiti cognitivi altamente circoscritti, al contrario dei primati, le cui capacità cognitive hanno una portata più ampia. Se questo fosse vero, corvidi e pappagalli dovrebbero fallire i test con un'ampia gamma di esercizi. Per studiare la questione, Bugnyar e io abbiamo cercato studi su diversi tipi di abilità cognitive nei primati non umani e ricerche simili effettuate su corvidi e pappagalli. Dopo aver raccolto tutte le pubblicazioni disponibili per otto aree della cognizione complessa, abbiamo concluso che le capacità cognitive di corvidi e pappagalli sono alla pari di quelle dei primati non umani, sia per intensità che per ampiezza.

Che corvidi e pappagalli siano uccelli intelligenti è risaputo. E gli altri uccelli, per esempio i piccioni? Se gazze europee, corvi imperiali e della Nuova Caledonia hanno cervelli che pesano rispettivamente circa 5,5, 8 e 14 grammi, quello dei piccioni pesa circa 2 grammi, cioè è paragonabile a quello di un ratto. Ma addirittura i piccioni sono più intelligenti di quanto si pensasse. Quando erano entrambi a Bochum, Lorenzo von Fersen e Juan Delius hanno dimostrato che i piccioni sono capaci di memorizzare 725 schemi astratti e usare la logica dell'inferenza transitiva (quella per cui, per esempio, possiamo dedurre che Alessia è più alta di Sara se sappiamo che Alessia è più alta di Sonia e Sonia è più alta di Sara.)

Di recente Damian Scarf e Mike Colombo, entrambi all'Università di Otago, in Nuova Zelanda, con il sottoscritto e altri colleghi, hanno dimostrato che i piccioni imparavano a distinguere tra gruppi di quattro lettere, composti da una vocale e tre consonanti, quelle che erano parole inglesi e quelle che non lo erano. I piccioni imparavano a padroneggiare questo esercizio e trasferivano la conoscenza appresa a nuovi gruppi di lettere usando strategie di sillabazione simili a quelle messe in pratica dagli alunni delle scuole elementari. In generale in questi casi i piccioni possono raggiungere prestazioni cognitive simili a quelle di corvidi e pappagalli in alcuni esercizi, ma non in tutti. Anche quando hanno successo, hanno bisogno di molto più tempo per imparare un esercizio e richiedono maggiore addestramento per capire una regola astratta. Non tutti gli uccelli sono intelligenti come un corvo o un pappagallo, ma sono più intelligenti di quanto si credesse in passato.

Se gli uccelli riescono in compiti cognitivi così diversi usando un cervello piccolo e privo di corteccia, è perché trovano un modo per compensare queste limitazioni. In effetti all'inizio degli anni sessanta Harvey Karten, che oggi lavora all'Università della California a San Diego, usò metodi nuovi per avviare una serie di studi con cui dimostrò che gran parte di quello che Edinger aveva definito subpallio negli uccelli doveva invece essere pallio. In seguito avrebbe dimostrato che le vie nervose sensoriali e motorie che collegano il pallio degli uccelli ad altre zone del cervello erano identiche a quelle della corteccia cerebrale nei mammiferi. Nel 2002 un consorzio internazionale di neuroscienziati ha riesaminato tutte le prove accumulate, e ha concluso che in effetti gli uccelli hanno un pallio molto più grande di quanto si presumesse in precedenza e che inoltre il loro pallio è simile a quello dei mammiferi, con il quale condivide un'origine comune.

Intelligenza aviaria: un pappagallo cenerino che soccombe a un'illusione (*1*), un corvo imperiale che usa uno strumento (*2*) e una ghiandaia della Florida che mette in mostra le sue capacità di memoria (*3*).

Arlene Levin-Rowe e Alex Foundation (*1*); Helena Osvath (*2*); Nicola Clayton (*3*)

Nei mammiferi il pallio non è costituito solo dalla corteccia cerebrale, ma include anche altre aree come ippocampo e parti dell'amigdala. Quanta parte del pallio negli uccelli sia simile alla corteccia cerebrale è ancora oggetto di discussione. Se alcuni ricercatori sono convinti che in gran parte sia simile ad alcuni strati corticali o tipi di cellule, per altri è principalmente analogo solo all'amigdala e ad altre aree non corticali del pallio. C'è da sottolineare che le strutture cerebrali diverse di due gruppi animali possono eseguire funzioni identiche grazie a un processo evolutivo chiamato evoluzione convergente. L'area prefrontale ne è un esempio perfetto. Nei mammiferi la corteccia prefrontale (PFC) ha un ruolo chiave in tutti gli aspetti della cognizione complessa.

All'inizio degli anni ottanta Jesper Mogensen e Ivan Divac, dell'Università di Copenaghen, sostennero che un'area nel pallio

posteriore del piccione somigliava alla PFC dei mammiferi. Dato che si trattava del primo indizio per la base neurale della cognizione negli uccelli, iniziai una serie di studi, che sto ancora portando avanti, per dimostrare che quell'area, il nidopallio (o nidopallium) caudolaterale (NCL), è una zona di incontro tra gli input sensoriali in entrata e i comandi che escono verso il sistema motorio per dare inizio a un'azione, proprio come il PFC. Come quest'ultima, NCL ha anche un ruolo cruciale in tutti i compiti cognitivi; i suoi neuroni codificano funzioni cognitive come prendere decisioni, rispettare le regole degli esperimenti e assegnare valori a varie opzioni prima di fare una scelta.

Anche se NCL e PFC sono molto simili, le prove genetiche e le rispettive posizioni nella parte più posteriore e più anteriore del pallio indicano che è poco probabile che derivino da un precursore comune degli uccelli e dei mammiferi. Invece è possibile che un tempo avessero funzioni molto diverse nei precursori dei mammiferi e degli uccelli, ma che poi, nel corso di 300 milioni di anni, si sia verificata una convergenza verso aree dedicate all'integrazione cognitiva degli input sensoriali e degli output motori. Durante la nostra ricerca ho spesso pensato alla famosa frase del Dr. Ian Malcolm in *Jurassic Park*: «La vita vince sempre». Se due gruppi animali diversi tra loro hanno entrambi bisogno di un'area cerebrale che controlli la cognizione, entrambi evolvono indipendentemente un'area prefrontale.

Per studiare come fisiologie distinte possano arrivare a fornire la stessa funzione cognitiva, con Murray Shanahan, dell'Imperial College di Londra, e altri colleghi abbiamo osservato come è strutturato il connettoma (il diagramma delle connessioni) nel pallio degli uccelli. Dato che il pallio aviario sembra molto diverso dalla corteccia cerebrale, ci aspettavamo che anche lo schema di connessioni fosse diverso, ma quando abbiamo ricostruito il connettoma dei piccioni abbiamo avuto una sorpresa: le reti nel pallio degli uccelli, con aree diverse dedicate a funzioni distinte, erano sorprendentemente simili a quelle nei mammiferi. La conclusione a cui siamo giunti è semplice: se due gruppi animali sviluppano funzioni mentali simili durante l'evoluzione, sviluppano anche gli stessi schemi di connessione, perché sembra che per funzioni mentali simili siano necessarie reti simili.

Rimaneva un serio interrogativo: da dove viene tutta la potenza cognitiva degli uccelli, considerate le dimensioni ridotte del loro cervello? Per trovare una risposta a questa domanda Seweryn Olkowicz e Pavel Němec, entrambi alla Charles University di Praga, nella Repubblica Ceca, assieme a Suzana Herculano-Houzel, che oggi è alla Vanderbilt University, e ad altri colleghi, hanno stimato il numero di neuroni presenti in 28 specie di uccelli e hanno scoperto con stupore che il cervello di corvidi e pappagalli contiene il doppio di neuroni rispetto a quello che i ricercatori si aspettavano in base alle sue dimensioni. Poiché questi neuroni «in sovrappiù» si trovano soprattutto nel pallio, corvidi e pappagalli hanno una potenza di calcolo superiore a quella di alcune scimmie dotate di cervello più grande.

Anche se gli uccelli hanno più neuroni di quanto ci si aspettasse, le dimensioni estremamente ridotte del loro cervello significano che rimane comunque un distacco tra il numero di neuroni di uccelli e mammiferi che sono allo stesso livello dal punto di vista cognitivo. Per esempio il kea (un pappagallo della Nuova Zelanda) ha 1,28 miliardi di neuroni nel pallio, il corvo imperiale 1,2 miliardi e lo scimpanzé 7,4 miliardi, anche se la ricerca non è stata in grado di dimostrare differenze cognitive sistematiche tra queste specie.

Come fanno gli uccelli a compensare questo distacco numerico? Si è scoperto che per loro una maggiore concentrazione dei neuroni significa che le distanze tra i neuroni sono più corte. Negli esercizi che prevedono l'invio ripetuto di informazioni avanti e indietro tra diversi gruppi di neuroni di cui è stipato il telencefalo, si può ottenere un risparmio di tempo perché i segnali ci mettono meno per spostarsi da un punto all'altro. In effetti con Sara Letzner e Christian Beste, entrambi al Politecnico di Dresda, in Germania, abbiamo dimostrato che i piccioni possono reagire più rapidamente degli esseri umani in un particolare compito cognitivo. La densità dei neuroni nel pallio degli uccelli compensa in parte la minore quantità, perché permette velocità di conduzione maggiori.

Una visione nuova della cognizione aviaria

Quando in tutto il mondo la scienza ha iniziato a scoprire le straordinarie capacità cognitive degli uccelli, l'idea dispregiativa che si aveva del cervello aviario ha perso il suo fondamento scientifico. In effetti oggi sappiamo che il cervello degli uccelli e quello dei mammiferi sono molto più simili di quanto si pensasse.

Da queste scoperte si può arrivare a una conoscenza più profonda. Per capirlo dobbiamo prima renderci conto che, indipendentemente gli uni dagli altri, uccelli e mammiferi si sono diffusi in tutto il pianeta, conquistando praticamente tutte le nicchie ecologiche in grado di sostentare un vertebrato. Così entrambi questi rami del regno animale sono diventati «specie generaliste» che non sono legate a un ecosistema limitato ma sopravvivono praticamente ovunque. Per trovare soluzioni a problemi nuovi e battere i rivali in astuzia erano necessarie ottime capacità cognitive, di conseguenza la forte pressione selettiva su entrambe le classi di vertebrati ha prodotto abilità cognitive molto sofisticate.

È meno interessante il fatto che entrambi i gruppi siano riusciti a diventare intelligenti. Questo risultato è stato raggiunto grazie allo sviluppo di meccanismi neurali in gran parte identici, al di là della diversa struttura del pallio. Entrambi i gruppi sono fioriti cognitivamente aumentando il numero di neuroni; i mammiferi l'hanno fatto espandendo le dimensioni del cervello, gli uccelli aumentando la densità di neuroni. Entrambi hanno sviluppato reti di connessioni sostanzialmente simili nel pallio e aree «prefrontali» con identiche caratteristiche fisiologiche, neurochimiche e funzionali. Altrettanto si può dire della cognizione in sé. Il modo in cui uccelli e mammiferi apprendono, ricordano, dimenticano, sbagliano, generalizzano e prendono decisioni segue principi identici.

Questo straordinario grado di somiglianza è possibile solo quando la natura mette forti limitazioni alla generazione di strutture neurali per la cognizione complessa. Uccelli e mammiferi hanno sviluppato meccanismi neurali e modi di pensiero simili, seguendo strade diverse per arrivare alla fine nello stesso posto. ■

PER APPROFONDIRE

New Caledonian Crows Reason about Hidden Causal Agents. Taylor A.H., e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 109, n. 40, pp. 16389-16391, 2 ottobre 2012.

Cognition without Cortex. Güntürkün O. e Bugnyar T., in «Trends in Cognitive Sciences», Vol. 20, n. 4, pp. 291-303, 1° aprile 2016.

Orthographic Processing in Pigeons (*Columba livia*). Scarf D. e altri, in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 113, n. 40, pp. 11272-11276, 4 ottobre 2016.

Ravens Parallel Great Apes in Flexible Planning for Tool-Use and Bartering. Kabadayi C. e Osvath M., in «Science», Vol. 357, pp. 202-204, 14 luglio 2017.

Inganni nel mondo animale. King B.J., in «Le Scienze» n. 615, novembre 2019.

SICUREZZA INFORMATICA

Senza GPS

Sabotare il sistema a cui tutti ci appoggiamo non è difficile, e gli Stati Uniti non hanno predisposto nessuna difesa

di Paul Tullis

IN BREVE

Si sospetta che alcuni hacker abbiano condotto attacchi contro i segnali GPS che guidano gli aerei di linea. Tra gli altri, anche le reti elettriche e i mercati azionari si appoggiano al sistema GPS per programmare le proprie attività.

I malintenzionati possono attaccare i segnali GPS in diversi modi, senza tecnologie complesse o costose e senza essere particolarmente esperti.

Molti paesi hanno un sistema terrestre di backup basato sulla tecnologia eLoran che è difficile da attaccare, ma gli Stati Uniti non ne hanno mai costruito uno.

Harry Campbell

Paul Tullis è un giornalista che si occupa delle intersezioni tra scienza, tecnologia e mondo degli affari.

Il 5 agosto 2016, il volo Cathay Pacific 905 da Hong Kong si stava dirigendo in orario verso l'aeroporto internazionale di Manila quando successe qualcosa di inaspettato. I piloti comunicarono via radio ai controllori di volo di aver perso il segnale GPS che avrebbe dovuto guidarli nelle ultime 8 miglia fino alla pista 24R. La risposta dei controllori fu di atterrare navigando a vista. L'impresa riuscì, ma non senza momenti di ansia.

Non fu un incidente isolato. Lo stesso anno, a luglio e ad agosto, nel solo aeroporto di Manila l'International Civil Aviation Organization ricevette oltre 50 segnalazioni di interferenze con il segnale GPS (Global Positioning System). In alcuni casi, i piloti furono costretti a continuare a volare in tondo sopra l'aeroporto prima di riprovare ad atterrare. Un disturbo simile del segnale può portare un equipaggio a perdere il controllo del velivolo. In un avviso di sicurezza dell'aprile scorso l'organizzazione ha scritto che oggi l'aviazione dipende da un accesso ininterrotto ai servizi di posizionamento, navigazione e misurazione del tempo via satellite, e che in questi sistemi le vulnerabilità e le minacce sono in aumento.

Negli ultimi anni i piloti hanno perso il segnale GPS all'improvviso durante l'avvicinamento in incidenti che hanno visto coinvolti almeno quattro aeroporti importanti. Secondo l'Aviation Safety Reporting System della NASA, nel giugno 2019 un aereo passeggeri che stava atterrando nell'Idaho si è quasi schiantato contro una montagna; la catastrofe è stata evitata solo grazie all'intervento di un controllore di volo particolarmente all'erta. Gli analisti della sicurezza aerea e gli ingegneri aerospaziali che hanno studiato gli eventi dicono che la causa più probabile, almeno in alcuni casi, è un'interferenza fraudolenta. Come spiega Martin Lauth, ex controllore di volo e oggi docente di gestione del traffico aereo alla Embry-Riddle Aeronautical University, in Florida, nello scenario più ottimista un disturbo del segnale GPS provoca ritardi significativi, perché i piloti sono costretti a cambiare rotta nelle ultime miglia della tratta, con costi per le linee aeree e i passeggeri. Un problema al GPS potrebbe portare alla chiusura di un aeroporto. Se qualcuno disturbasse il segnale GPS e il sistema di atterraggio strumentale nei principali aeroporti dell'area metropolitana di New York, non ci sarebbe alcun luogo in cui dirottare senza problemi gli aeroplani in avvicinamento. In particolare, i voli transoceanici in arrivo comincerebbero presto a essere a corto di carburante.

Per quanto siamo abituati a pensare al GPS come a uno strumento utile per trovare un ristorante o il luogo di un appuntamento, la funzione di misurazione del tempo della costellazione di satelliti è una componente di tutti i 16 settori infrastrutturali considerati «critici» dal Departement of Homeland Security (DHS) che si occupa della sicurezza interna degli Stati Uniti. Le reti cellulari per le telecomunicazioni, i mercati azionari, la rete elettrica e i servizi di emergenza sono solo alcuni dei sistemi per le cui attività il tempo è cruciale. Ma il sistema GPS è vulnerabile. A causa della grande distanza che le onde radio devono percorrere – quasi 20.000 chilometri separano i satelliti e i ricevitori sulla Terra – i segnali sono deboli e facili da disturbare, (in gergo, *jamming*), come pare sia successo a Manila. Un'altra facile tecnica di attacco è lo *spoofing*: emettendo un segnale leggermente più intenso di quello GPS con una trasmittente che può essere generata da un software installato su un computer portatile è possibile trasmettere un messaggio falso o ritrasmettere un messaggio autentico pieno di informazioni false, facendo credere a chi lo riceve di trovarsi in un punto dello spazio, o in un momento nel tempo, diverso dalla realtà.

Nel caso di infrastrutture critiche, un errore di qualche microsecondo può causare avarie a cascata tali da mettere fuori uso un intero network. Interpellati da «Scientific American», Todd Humphreys, professore associato di ingegneria aerospaziale all'Università del Texas ad Austin, Dana Goward, membro dello U.S. National Space-Based Positioning, Navigation and Timing Advisory Board (un comitato federale) e l'ex dirigente di un importante fornitore della Difesa, hanno dichiarato tutti di temere che un nemico straniero o un gruppo terrorista possano coordinare attacchi multipli di jamming e spoofing ai ricevitori GPS mettendo in crisi il funzionamento della rete elettrica, delle reti cellulari, dei mercati, degli ospedali, degli aeroporti e così via: contemporaneamente e senza essere rilevati.

La cosa davvero sorprendente è che i rivali degli Stati Uniti non soffrono di questa vulnerabilità. Cina, Russia e Iran hanno sistemi di backup terrestri a cui gli utenti GPS possono appoggiarsi in caso di bisogno e nei quali è molto più difficile intrufolarsi rispetto al sistema satellitare. Una direttiva presidenziale del 2004 relativa alla costruzione di un sistema di backup di questo tipo è rimasta nel cassetto. Come commentano gli esperti di catastrofi, sembra sempre che gli Stati Uniti si stiano preparando per il disastro precedente, non per quello che sta per colpirli.

La dipendenza diventa un obiettivo

Attualmente la rete GPS è un network di 31 satelliti noto come Navstar, operato da squadre della U.S. Air Force. Per garantire la precisione, le squadre inviano ai satelliti di passaggio fino a tre volte al giorno l'orario (UTC) tramite un network di quattro antenne poste in luoghi che vanno da Cape Canaveral all'atollo di Kwajalein. Grazie agli orologi atomici di cui è dotato ogni satellite, il segnale orario ha una precisione superiore ai 40 nanosecondi, corretta relativisticamente: infatti, come prevede la relatività generale, ogni giorno gli orologi dei satelliti sono in anticipo di cir-

I satelliti GPS (1) svolgono un compito complesso, fornendo l'ora esatta a centri dati come questo (2) di Secaucus, nel New Jersey, che coordina le transazioni delle più importanti borse valori.

Lockheed Martin (1); Chang W. Lee, «New York Times» e Redux Pictures (2)

ca 45 microsecondi rispetto a quelli sulla Terra; allo stesso tempo, secondo la relatività speciale accumulano un ritardo giornaliero di sette microsecondi.

Ogni satellite trasmette continuamente un codice binario su una di molte frequenze. Sia gli utenti militari sia quelli civili ottengono una trasmissione esclusiva, le trasmissioni sono tenute separate da bit speciali di codice e sfasandole di 90 gradi tra loro. I segnali contengono pacchetti di dati che codificano l'ora esatta, la posizione del satellite nell'istante della trasmissione e le orbite e lo stato degli altri satelliti. Il ricevitore GPS di uno smartphone determina la propria posizione calcolando il tempo impiegato dai segnali radio trasmessi dei satelliti per arrivare, che consente di determinarne la distanza dal telefono. Sono necessari almeno quattro segnali perché il ricevitore possa definire con precisione la propria posizione e l'ora esatta, motivo per cui potreste non disporre più del vostro comodo navigatore quando vi trovate tra i grattacieli di Manhattan o nelle strette calli veneziane. Negli Stati Uniti, le infrastrutture critiche hanno numerosi ricevitori che sincronizzano le attività.

Gli hacker possono disturbare un segnale inondandolo di rumore inutile (*jamming*) oppure falsificarlo dando al ricevitore tempi o coordinate sbagliati, cosa che lo disorienterà spazialmente o temporalmente (*spoofing*). Quando un dispositivo ha perso l'orario corretto, può inviare quello sbagliato ad altri dello stesso network, confondendo tutto il sistema e deteriorandone le attività.

Il settore industriale ha un particolare bisogno del GPS perché è il modo più accurato di tenere traccia del tempo sulla Terra, ed è gratuito. Prima del GPS gli operatori elettrici potevano solo stimare il carico delle linee di trasmissione, e questo portava a inefficienze; oggi, grazie all'orario GPS, riescono a seguire lo stato della rete elettrica e a ottimizzare le attività in risposta alle richieste in tempo reale. Un tempo i mercati finanziari impostavano l'ora di tutto il sistema con un orologio appeso al muro. Oggi tutti i sistemi finanziari – dal POS del bar all'angolo ai mercati azionari – usano il GPS per marcare temporalmente e verificare le transazioni.

Le reti di telecomunicazione cellulare usano il GPS per separare, inviare e ricomporre i pacchetti di dati e far passare le chiamate da una cella all'altra quando un telefono si sposta. I dati medici in formato elettronico riportano automaticamente l'ora segnata dal GPS. I network televisivi usano il GPS per dimostrare agli inserzionisti che le pubblicità sono andate in onda nelle fasce orarie per cui hanno pagato. In tutto il mondo si usano oltre 2 miliardi di apparecchi GPS.

L'enorme dipendenza dal GPS è un obiettivo allettante. La vulnerabilità del sistema offre l'opportunità di provocare caos, ed è stato dimostrato che disturbarlo è possibile. L'unico fattore incerto è se un individuo o un gruppo di individui sceglierebbero il GPS per un attacco di qualche tipo. Sembra sempre più che la risposta sia positiva. Come dice Humphreys, «oggi abbiamo continue dimostrazioni di attacchi spoofing sponsorizzati da Stati sovrani».

Uno di questi Stati è la Russia. Nel marzo 2019 il Center for Advanced Defense Studies di Washington, un'organizzazione di ricerca no-profit, ha identificato quasi 10.000 incidenti partiti da dieci località che includevano la Federazione Russa, la Crimea e la Siria. Esperti del governo degli Stati Uniti e del mondo accademico sostengono che potrebbero fare qualcosa di simile anche l'Iran e la Corea del Nord. Si tratta di una capacità condivisa da «molte nazioni e organizzazioni», commenta Goward.

Un consulente governativo che ha ripetutamente messo in guardia il Congresso, un ex dirigente di un fornitore della Difesa e un ex funzionario federale che preferisce non essere nominato hanno detto a «Scientific American» che un multi-attacco jamming e spoofing coordinato a vari sistemi in tutti gli Stati Uniti sarebbe facile, economico e disastroso. «Può essere fatto su scala enorme e con obiettivi mirati», aggiunge Goward. Uno spoofer costa circa 5000 dollari, e le istruzioni si trovano on line. Eppure si tratta di uno strumento da cui è difficile difendersi: «Anche una banale funzione di mitigazione dello spoofing contro gli attacchi più semplici non è semplice da mettere a punto», ha scritto per la rivista specializzata «Inside GNSS Gerhard Berz», che si occupa di infrastrutture per la navigazione per Eurocontrol, l'agenzia europea per il controllo del traffico aereo.

Attacchi distribuiti

Un attacco coordinato su larga scala alle infrastrutture degli Stati Uniti potrebbe essere messo in atto da 10 o 12 operatori umani con l'attrezzatura adatta sparsi in tutto il territorio nazionale. L'11 settembre 2001 la storia è stata cambiata da 19 agenti di al Qaeda basati negli Stati Uniti; per un attacco ostile al sistema GPS, tuttavia, non ci sarebbe bisogno di una devozione religiosa votata al

Il GPS: affidabile ma vulnerabile

La rete elettrica, i mercati azionari, le banche, gli aerei di linea e le reti dei telefoni cellulari dipendono tutti dal sistema satellitare GPS per coordinare nel tempo le proprie complesse attività. Non è difficile per gli hacker irrompere nel sistema e confondere il segnale orario, con conseguenze potenzialmente dannose. Molti paesi, in caso di attacco, hanno un network terrestre di backup, ma non gli Stati Uniti.

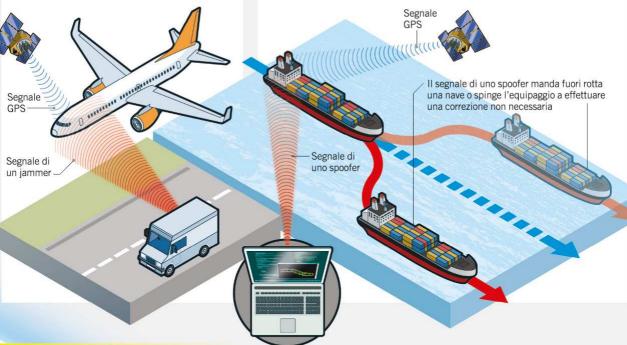
Come funziona il GPS

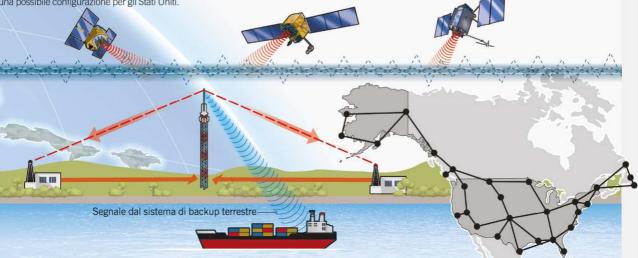
I satelliti GPS inviano segnali sincronizzati che ne specificano la posizione e il tempo a ogni istante. Un dispositivo GPS (individuo nel cerchio rosso) riceve segnali da almeno quattro satelliti e confronta le differenze nei tempi di arrivo per determinare la propria posizione. I codici allineano l'orologio del ricevitore con gli orologi atomici a bordo dei satelliti, segnando l'ora esatta.

Due possibili metodi di attacco

Un'interferenza con il segnale orario GPS può provocare blackout elettrici, crolli del mercato azionario e far perdere agli aeroplani di linea il segnale che li guida durante l'atterraggio. Gli hacker possono sovrastare (*jamming*) o imitare (*spoofing*) le onde radio trasmesse dai satelliti GPS, fornendo informazioni false.

Jamming
Quando raggiungono la Terra, le trasmissioni radio GPS hanno una potenza molto bassa. Un hacker che si trovi vicino a un ricevitore può annacquare la trasmissione sparando a raffica del rumore inutile alla stessa frequenza, rendendo difficile al ricevitore mantenere la connessione o addirittura agganciarsi del tutto al segnale.

Spoofing
Ogni satellite GPS invia un codice univoco che lo identifica. Un hacker vicino a un ricevitore può intercettare i codici in entrata e ritrasmetterli, aumentandone lentamente la potenza finché il ricevitore passa all'hacker come fonte di origine. L'hacker, a questo punto, può inviare nuovi segnali radio che depistano il ricevitore o fanno credere agli operatori umani di essere sulla rotta sbagliata, spingendoli ad apportare correzioni erronee.

Contrastare gli attacchi con i sistemi di backup

Molti paesi hanno un network di backup a cui alcuni ricevitori possono appoggiarsi se perdono il segnale delle trasmissioni via satellite, o se queste ultime sono attaccate. Le stazioni e le antenne principali, a terra, emettono intense onde radio a bassa frequenza, molto resistenti ad attacchi jammer e spoofer. Un ricevitore si collega ai segnali di molte coppie di trasmettitori per determinare la propria posizione nel tempo e nello spazio, anche se la precisione è inferiore a quella data dal GPS. Per essere efficace, un network dovrebbe estendersi a livello nazionale o regionale; in figura è illustrata una possibile configurazione per gli Stati Uniti.

Ben Gilliland (*illustrazione*); fonte: National Maritime PNT Office (*mappa di trasmissione USA*)

martirio, della preparazione tecnica richiesta per pilotare un aeroplano o della violenza necessaria per uccidere un pilota. È possibile che l'unica cosa che riesca a bloccare un attacco al GPS sia il diritto internazionale, che riconosce la guerra elettronica come equivalente a un atto violento se gli effetti provocati sono simili. Un'ampia disattivazione delle infrastrutture civili comporterebbe probabilmente una risposta militare da parte degli Stati Uniti, fattore che almeno fino a oggi può averne dissuaso i nemici.

Anche se le vite umane perse a causa di un attacco al sistema GPS sarebbero probabilmente meno numerose dell'11 settembre, gli effetti invalidanti potrebbero essere più diffusi. Ecco un possibile scenario: in alcuni incroci stradali in punti nevralgici di varie città vengono cambiate le luci dei semafori in modo che siano sempre verdi in tutte le direzioni. In un edificio vicino a ogni incrocio, un hacker attiva una trasmissione pirata con un computer portatile e genera una copia falsa della portante in radiofrequenza, del rumore e dei bit di dati provenienti dal provider dei sistemi di navigazione satellitare globale usati dal semaforo. Per indurlo a collegarsi al segnale fasullo, l'hacker interrompe la normale procedura di tracciamento del semaforo, forzandolo a riacquisire un segnale. Se il segnale falso è più intenso, è probabile che il semaforo lo scelga. A questo punto, avendo accesso alla centralina che regola il semaforo, lo spoofing può procedere: si emette un segnale orario sbagliato, attivando per esempio la luce verde del semaforo lungo la direttrice nord-sud prima che la luce rossa del semaforo est-ovest si sia spenta.

Un'interruzione del GPS avrebbe conseguenze economiche disastrose

L'attacco potrebbe essere coordinato da più hacker disposti in incroci diversi o in città diverse, oppure uno di loro potrebbe innescare interruzioni a cascata negli incroci di un'unica città. Quando ho presentato questo scenario a un supervisore degli addetti alla manutenzione dei semafori di San Francisco, coinvolto da vicino negli appalti cittadini per l'acquisto delle centraline semaforiche, il mio interlocutore non pensava che fosse possibile mettere in atto una connessione wireless con il ricevitore GPS dei semafori e cambiare il segnale. Eppure i moduli GPS della Garmin usati nei semafori di San Francisco non usano alcuna protezione anti-spoofing, anzi: le specifiche tecniche del produttore dichiarano che per conformità alle norme della Federal Communications Commission l'apparecchio Garmin deve accettare qualsiasi interferenza a radiofrequenza che incontra, anche nel caso in cui possa disturbarne il funzionamento.

Non tutte le città usano il GPS per sincronizzare i semafori, ma le alternative non sono necessariamente migliori. Dale Picha, dirigente della gestione del traffico del Texas Department of Transportation del distretto di San Antonio, dice che il distretto ha preso le distanze dai ricevitori GPS nelle singole centraline semaforiche, preferendo ottenere l'ora esatta dalle reti cellulari. Ma anche queste ultime possono essere oggetto di spoofing.

Le persone ferite in caso di incidenti stradali possono dover aspettare gli aiuti per un bel po' di tempo perché le radio del personale delle ambulanze si appoggiano al sistema GPS. Quando nel 2016, a causa di un'anomalia, molti satelliti GPS inviarono un orario sbagliato, praticamente tutti gli operatori dei servizi di emergenza del Nord America ebbero problemi nelle comunicazioni.

Un obiettivo più importante potrebbe essere il sistema della finanza globale. In un'area paludosa dello stato del New Jersey, strumenti finanziari del valore di migliaia di miliardi di dollari sono scambiati ogni giorno sotto forma di bit e byte. Si trova qui il centro dati Equinix, che ospita 49 borse valori, tra cui la Borsa di New York. Introdurre un errore in un ricevitore GPS che stabilisce l'ora esatta di ogni transazione «introdurrebbe confusione nelle operazioni finanziarie», commenta Andrew F. Bach, ex presidente globale dei servizi telematici della Borsa di New York. Vedendo che c'è qualcosa che non va, i computer – che oggi rappresentano il 60 per cento del volume del mercato, secondo J.P. Morgan – potrebbero decidere di sospendere le operazioni. «Quando troppe persone cercano di uscire contemporaneamente, è un problema serio», aggiunge Andrew Lo, professore di finanza alla Sloan School of Management del Massachusetts Institute of Technology. «Si può arrivare a un *flash crash* [una flessione fulminea e importante nei prezzi delle azioni] o a qualcosa di ben più duraturo». Noah Stoffman, professore associato di finanza alla School of Business dell'Università dell'Indiana, aggiunge: «Non faccio fatica a immaginare che un'interruzione ostile del GPS avrebbe conseguenze economiche disastrose».

Mentre a New York i mercati barcollano, gli hacker potrebbero attaccare anche la rete elettrica nel cuore del paese grazie a un pezzo di hardware presente praticamente in tutte le sottostazioni locali. La sottostazione elettrica di Fordham della Platte River Power Authority a Longmont, in Colorado, si trova 35 chilometri a nord di Denver; è una sottostazione tipica sia per il tipo di apparecchiature sia per la facilità con cui potrebbe essere raggiunta da un potenziale attacco. Situato dietro un muro di oltre tre metri e mezzo dietro a un albergo, questo impianto a cielo aperto riduce l'elettricità generata in una grande centrale elettrica a gas situata a chilometri di distanza nelle linee di trasmissione ad alta tensione fino al livello adeguato perché le linee locali possano soddisfare 348.000 clienti privati e commerciali a Logmont e in altre tre città vicine.

All'interno della struttura, che occupa un'area di quasi due ettari e mezzo, sono sparse scatole di metallo contenenti *Phasor Measurement Units* (PMU), dispositivi di misura che monitorano lo stato della rete elettrica. Nei PMU, il tempo è impostato grazie alla rete GPS. Jeff Dagle, ingegnere elettrico del Pacific Northwest National Laboratory insiste che dal momento che i PMU non sono di importanza critica per le attività operative di una rete, se subissero un attacco spoofing non ci sarebbe un blackout. Un rapporto del NIST pubblicato a settembre del 2017, tuttavia, afferma che un attacco spoofing ai PMU potrebbe costringere un generatore ad andare *off line*. La perdita improvvisa di molti generatori di grandi dimensioni «porterebbe a un istantaneo squilibrio tra la domanda e l'offerta, rendendo la rete instabile»: un potenziale blackout. Humphreys e colleghi hanno simulato in laboratorio un guasto nei meccanismi di temporizzazione analogo a quello descritto. Sebbene i PMU siano dietro un muro, i loro ricevitori GPS potrebbero essere attaccati da qualcuno che si trova in una stanza dell'albergo a poche centinaia di metri di distanza. In tutti gli Stati Uniti, le sottostazioni sono circa 55.000.

Goward e Humphreys hanno avvisato del pericolo i dirigenti del servizio elettrico: pochi ne sono consapevoli, e ancora meno hanno piani di emergenza adeguati (alcuni dei quali si appoggiano anch'essi al sistema GPS). I controllori umani che supervisionano i network elettrici «lascerebbero probabilmente passare parecchie ore prima di pensare al GPS come a una possibile fonte del problema», conclude Godward, aggiungendo che «gli hacker riuscirebbero a camuffare l'attacco per un tempo abbastanza lungo».

I blackout elettrici sono costosi e pericolosi, ma un attacco a un aereo sarebbe probabilmente la situazione peggiore. Humphreys e Berz di Eurocontrol sono d'accordo: sarebbe difficile, ma possibile. L'aviazione militare usa un apparecchio chiamato *selective availability anti-spoofing module*, che però non è obbligatorio sugli aerei civili, e il governo ne limita fortemente l'uso. Lauth, che forma controllori di volo, mi ha spiegato che i piloti hanno altre opzioni per atterrare. Il backup principale, tuttavia, è il sistema di atterraggio strumentale di un aeroporto, che fornisce ai velivoli una guida sugli assi orizzontale e verticale e la distanza dal punto di atterraggio. Il sistema opera sulle frequenze radio, ed è stato costruito per sicurezza, non per protezione, quindi non è cifrato; ciò significa che è possibile effettuare un attacco spoofing inducendo il ricevitore del velivolo a collegarsi a un segnale falso.

Migliorare la resilienza

La società continuerà a usare il GPS sempre di più. L'Internet «delle cose» resa possibile dalla tecnologia 5G dipenderà pesantemente dal GPS, perché gli apparecchi hanno bisogno di un orario preciso per sincronizzarsi nei network. Lo stesso vale per il *mirror world*, la rappresentazione digitale del mondo reale che le macchine dovranno produrre per le applicazioni di intelligenza artificiale e realtà aumentata.

Sebbene il DHS riconosca la realtà della minaccia, non tutti sono soddisfatti di quello che si sta – o non si sta – facendo al proposito. James Platt, direttore dell'ufficio per la posizione, la navigazione e il tempo del DHS, dice che l'agenzia sta lavorando per stabilire diversi livelli di sicurezza per i diversi tipi di ricevitori. Il DHS conduce anche esercitazioni annuali che consentono ai produttori degli apparecchi di testare le proprie macchine contro eventuali attacchi. I risultati non sono pubblici, ma Logan Scott, un consulente che ha lavorato con il GPS per quarant'anni, commenta che «molti ricevitori non si comportano bene quando sono oggetto di attacchi jamming e spoofing».

Protezioni e nuove minacce sono impegnate in una sorta di corsa agli armamenti

L'anti-spoofing è un ambito di ricerca molto fiorente, con centinaia di articoli pubblicati negli ultimi anni. Per esempio, durante un attacco spoofing, un residuo del vero segnale GPS si manifesta sul ricevitore come distorsione. Ricevitori specializzati possono monitorare questa distorsione ed emettere un allarme quando la rivelano, ma l'hacker può generare un segnale che la annulla. «Non esiste una difesa infallibile», dice Humphreys. «Quello che si può provare a fare è battere l'avversario sul budget» investendo in protezioni anti-spoofing. Con l'equipaggiamento giusto, tuttavia, un hacker può aggirarle. Protezioni e nuove minacce sono in continua evoluzione, in una sorta di corsa agli armamenti nello spettro delle radiofrequenze. «E se per caso – conclude Humphreys – il tuo avversario è la Federazione Russa… buona fortuna».

La corsa agli armamenti potrebbe essere disinnescata se gli Stati Uniti costruissero un sistema di backup per la misura del tempo come quelli di altri paesi. Nel dicembre 2018 il presidente Donald Trump ha firmato il National Timing Resilience and Security Act, che prescrive al Department of Transportation (DOT) di costruire un «sistema di misura del tempo alternativo a base terrestre, resiliente e affidabile» entro il 2020. Dove reperire i fondi per il progetto, però, non è stato indicato né dalla legge né dal presidente.

Questo, secondo i critici, è solo l'ultimo esempio dell'inadeguatezza delle risposte del governo degli Stati Uniti. Il DHS pubblicò un rapporto sulla vulnerabilità del GPS già nel 2001. Nel 2004 il presidente George W. Bush ordinò al DHS e al DOT di creare un sistema di backup. Nel 2015 il vice segretario alla Difesa e il vice segretario ai Trasporti annunciarono che avrebbero collaborato per costruire un sistema detto eLoran (*enhanced long-range navigation*, navigazione di lungo raggio migliorata), che fa esattamente quanto richiesto dalla legge del 2018. Il Congresso ha finanziato un programma pilota eLoran molti anni fa, ma di quel finanziamento non è stato speso nemmeno un centesimo.

Adam Sullivan, sottosegretario del DOT per gli affari di governo, ha dichiarato in una lettera dell'8 maggio a Peter DeFazio, presidente dello House Transportation and Infrastructure Committee, che il DOT «ha in progetto di condurre una dimostrazione sul campo di tecnologie […] capaci di fornire servizi di backup [posizione, navigazione e tempo] alle infrastrutture critiche» entro la fine del 2019. A settembre, il DOT ha pubblicato un invito a presentare proposte, una settimana dopo che i senatori Ted Cruz e Ed Markey avevano scritto al segretario ai Trasporti chiedendogli perché ci stessero mettendo tanto tempo.

Un sistema eLoran renderebbe gli attacchi spoofing e jamming quasi innocui, emettendo un segnale radio a bassa frequenza molto più intenso di quello ad altissima frequenza del GPS e a cui è quindi praticamente impossibile sostituirsi.

Secondo Goward e il deputato John Garamendi il piano per il sistema eLoran richiede di costruire una ventina di antenne giganti per una copertura nazionale con una partnership fra pubblico e privato. Si dice che la U.S. Air Force e il Pentagono stiano vagliando anche altri possibili sistemi di backup. Molte nazioni si appoggiano a quelle che sono essenzialmente versioni diverse di eLoran. Tuttavia, anche iniziando i lavori domani ci vorranno anni prima che il sistema eLoran sia completato, e ancora di più per progettare, fabbricare e distribuire ai consumatori nuovi apparecchi e ricevitori in grado di operare con quel segnale. Secondo Frank Prautzsch, ex direttore dei sistemi di reti della società Raytheon, «una stima di quattro anni è ottimistica».

Un'altra soluzione tampone globale sarebbe alterare i segnali GPS alla fonte, apponendo firme digitali che autenticano i dati e cifrando i segnali con una tipica crittografia a chiave pubblica. Ma i segnali provenienti dall'attuale costellazione di satelliti non possono essere modificati. Un portavoce della U.S. Air Force ha detto che non esistono piani per incorporare firme digitali nella prossima generazione di satelliti attualmente in costruzione in un impianto sicuro della Lockheed Martin.

Nonostante tutto questo, Platt ha fiducia nella resilienza delle infrastrutture critiche: «Abbiamo parlato con l'industria per assicurarci che ci siano delle strategie di mitigazione». Questa la risposta di Goward: «Suggerite a Jim di spegnere la rete GPS per ventiquattr'ore, tanto per vedere cosa succede». ■

PER APPROFONDIRE

Above Us Only Stars: Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria. C4ADS, 26 marzo 2019.

Dual-Antenna GNNS Spoofing Detection Method Based on Doppler Frequency Difference of Arrival. He L. e altri, in «GPS Solutions», Vol. 23, articolo n. 78, luglio 2019.

Il Global Positioning System. Herring T.A., in «Le Scienze» n. 332, aprile 1996.

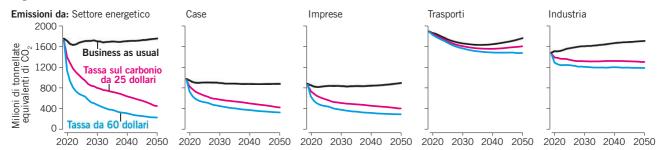
Un'analisi degli effetti di una tassa sul carbonio negli Stati Uniti mostra che le emissioni di CO_2 diminuirebbero e i posti di lavoro aumenterebbero

Meno emissioni, più lavoro

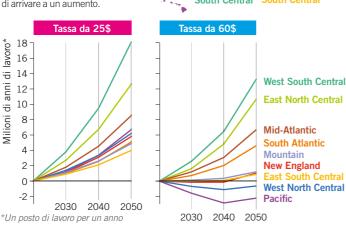
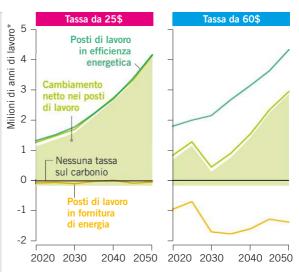
Esperti statunitensi dibattono dell'impatto sui posti di lavoro di una tassa sul carbonio fin da quando il Partito verde degli Stati Uniti ha proposto il Green New Deal, un piano per un'economia sostenibile e pulita dal punto di vista ambientale. Nei tre anni passati alcuni legislatori e candidati Democratici alla presidenza hanno presentato piani fiscali o proposte di legge con impatti assai variabili sul lavoro. Marilyn Brown e Majid Ahmadi del Georgia Institute of Technology hanno analizzato i dettagli del Green New Deal in un modello economico-energetico della U.S. Energy Information Administration. Hanno valutato una tassa da 25 e una da 60 dollari su ogni tonnellata metrica di CO_2 emessa dal sistema energetico statunitense. Entrambe taglierebbero le emissioni, e la tassa di 25 dollari creerebbe più posti di lavoro di quella da 60 dollari.

Mark Fischetti

Le emissioni di anidride carbonica diminuiscono

Se l'economia degli Stati Uniti continua nello scenario *business-as-usual*, senza tassa sul carbonio e senza nuove politiche e normative energetiche, le emissioni di CO_2 restano alte o crescono fino al 2050 in tutti i settori (*linea nera*). Con una tassa di 25 o 60 dollari le emissioni calano nettamente, soprattutto nel settore energetico.

I posti di lavoro aumentano

Posti di lavoro per regione
Una tassa di 25 dollari porterebbe ulteriori 72 milioni di anni di lavoro (un posto di lavoro per un anno) in tutte le divisioni censuarie degli Stati Uniti, rispetto al business-as-usual. Una tassa di 60 dollari porterebbe posti di lavoro, ma non così tanti; le regioni Pacific e West North Central vedrebbero perdite fino al 2040 prima di arrivare a un aumento.

*Un posto di lavoro per un anno

Tipi di lavoro
Con una tassa di 25 dollari, i tradizionali lavori di fornitura di energia, come per i carburanti e la generazione di elettricità, diminuirebbero, ma quelli nel settore dell'efficienza energetica, come nelle costruzioni e nella manifattura, compenserebbero la perdita, creando un guadagno netto (*area verde*) di 4,2 milioni di anni di lavoro nel 2050. Una tassa di 60 dollari, provocherebbe una perdita più grande nella fornitura di energia, ma i guadagni nell'efficienza porterebbero ancora a un aumento netto.

Grafica di Amanda Montañez; fonte: *Would A Green New Deal Add or Kill Jobs?* di Marilyn A. Brown e Majid Ahmadi, Scientific American.com, 19 dicembre 2019

di Paolo Attivissimo

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Giornalismo, bollini e scienza

L'iscrizione all'ordine professionale dei giornalisti non è una garanzia di competenza scientifica

"Coronavirus, costruito ospedale in 10 giorni a Wuhan per combattere il batterio», ha titolato di recente una testata giornalistica registrata. Un'altra ha annunciato un progetto di un aereo «in grado di viaggiare a una velocità pari a dieci volte quella della luce». Una terza ha raccontato il caso di «13.000 tonnellate di rifiuti altamente inquinanti [...] chiuse in un container». C'è poi l'agenzia di stampa che ha annunciato la scoperta di «un nuovo logaritmo [sic] che permetterà il collaudo di macchine» e ha comunicato che una mongolfiera in Egitto è precipitata perché «l'elio contenuto nella bombola [...] si è incendiato». Secondo altri giornali, la Stazione spaziale internazionale sarebbe stata «attaccata da insetti spaziali» che «corrodono il metallo» ed è stato scoperto «un modo per sviluppare un idrogeno privo di ossigeno».

Anche in campo astronomico le castronerie giornalistiche abbondano: la spettacolare eclissi di Luna di luglio 2018 fu accompagnata da un coro di articoli e servizi televisivi che spiegarono, per così dire, che il nostro satellite sarebbe diventato rosso a causa della vicinanza di Marte.

Analfabetismo diffuso

A volte queste castronerie diventano fisicamente pericolose, come nel caso di chi, nel 2019, invitò a osservare il transito di Mercurio davanti al Sole prendendo in mano un binocolo, col rischio di concentrare la luce solare sulla retina e causare danni permanenti alla vista.

In altri casi possono influenzare fortemente l'opinione pubblica su temi delicatissimi come il cambiamento climatico: se per esempio un giornale nazionale annuncia che nel Michigan fa così freddo che ci sono foto di «un'onda imponente che si ghiaccia ancora prima di infrangersi», fenomeno «fino ad oggi comune solo alle zone polari», c'è il rischio che molti lettori, fidandosi, deducano che la notizia smentisce la tesi del riscaldamento globale, senza accorgersi che le foto mostrano in realtà spaccature del ghiaccio in Antartide.

Certo, non tutta la comunicazione giornalistica della scienza è così grottescamente sbagliata: ma questi esempi, che sono solo assaggi di un repertorio ben più vasto, delineano un analfabetismo scientifico, persino su concetti di base, diffuso in misura preoccupante fra i giornalisti generalisti, ossia fra coloro che hanno il ruolo delicatissimo di informarci sugli avvenimenti del mondo, orientando le nostre scelte.

Per questo ritengo che le recenti proposte di istituire un «bollino di garanzia» che attesti che l'autore di un articolo è effettivamente iscritto all'Ordine dei giornalisti, con l'intento di arginare il problema delle *fake news*, siano peggio che inutili.

Affidabilità fasulla

Tutte le false notizie scientifiche che ho citato sono state scritte o approvate da un giornalista. Un bollino creerebbe una sensazione fasulla di affidabilità, screditando invece i tanti medici, fisici, chimici, astronomi, informatici che pubblicano informazioni scientifiche corrette nei propri siti e nei *social network*: Roberto Burioni, per esempio, scriverebbe di medicina senza «bollino», poiché non è un giornalista.

I fatti della scienza vanno raccontati da chi l'ha studiata, non da chi ha conquistato una tessera senza sapere la differenza fra virus e batteri oppure fra velocità del suono e velocità della luce e non si prende la briga perlomeno di consultare una persona esperta prima di pubblicare.

Altrimenti ci si ritrova con titoli come questo: «Vivere senza cibo, sempre più italiani scoprono il 'respirianesimo'». Pubblicato da una nota agenzia di stampa e ancora disponibile *on line*, senza alcuna rettifica o precisazione, a distanza di cinque anni.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Inventare una malattia

La pratica del *disease mongering* risale a una campagna pubblicitaria di un secolo fa

Tutto è iniziato col Listerine. Sì, proprio il collutorio. Una soluzione a base alcolica, con un profumo particolare diventato da subito caratteristico, inventata nel 1879 dal chimico Joseph Lawrence come disinfettante generico che poteva servire per combattere la forfora, pulire i pavimenti o per trattare la gonorrea. Il suo nome è un omaggio a Joseph Lister, uno dei padri della chirurgia moderna che ha introdotto alcune delle pratiche di disinfezione che hanno permesso ai pazienti di superare le operazioni senza morire di setticemia.

Nel 1881 Lawrence vendette la licenza d'utilizzo a Jordan Wheat Lambert, il proprietario della farmacia locale da cui si riforniva, che intravide subito le potenzialità del prodotto e lavorò sodo per promuoverlo soprattutto tra i dentisti come disinfettante. Tuttavia, per ampliare ulteriormente il mercato e arrivare ai consumatori serviva qualcosa di più. Serviva un problema specifico da risolvere o, meglio, una malattia da curare.

I crucci di Edna

«Avete detto "alitosi"?» chiese un giorno Gordon Seagrove, un pubblicitario coinvolto dai figli di Lambert. La curiosità di Seagrove si accese quando, nel raccontare che le caratteristiche del prodotto, gli dissero che poteva ridurre anche l'alito cattivo. La parola «alitosi» non era di uso comune all'epoca, ma suonava benissimo. L'origine latina e il suffisso «osi» rimandavano subito al mondo della medicina. Un appiglio perfetto per creare una campagna pubblicitaria audace e, per certi versi, spietata.

«Come per ogni donna, la sua principale ambizione era sposarsi», recitava la didascalia di una pubblicità del Listerine. La fotografia ritraeva una donna piacente con lo sguardo triste e malinconico. «Mentre i suoi compleanni si avvicinano gradualmente verso il tragico traguardo dei trenta – continuava il testo – il matrimonio sembra sempre più lontano». Scopriamo che Edna, la protagonista, è destinata a essere «per sempre una damigella, ma mai una sposa». Tutta colpa dell'alitosi. Altre donne e altri uomini venivano ritratti in situazioni simili, chi con un cane pur avendo sempre voluto aver figli, chi sola di fianco a una coppia felice, chi bloccato nella carriera, chi tradito. Di fatto, l'azienda di Lambert, aveva creato una malattia che prima non c'era, ma non una malattia qualsiasi, qualcosa su cui riversare le proprie frustrazioni e a cui dare la colpa per non aver raggiunto determinati obiettivi.

Vergogna e paura

Intendiamoci, l'alito cattivo è sempre esistito. Anzi, in passato, con condizioni igieniche non ottimali, il cattivo odore dell'alito era una condizione abbastanza comune, ma nessuno aveva mai pensato fosse una malattia. Il risultato della campagna pubblicitaria fu strabiliante. Le vendite del Listerine passarono da 100.000 a otto milioni di dollari nei sette anni dal 1921 al 1927, dando l'ispirazione a molte altre aziende per campagne simili.

Oggi questa tecnica ha un nome preciso: *disease mongering*, cioè l'invenzione di una malattia. È stata la giornalista scientifica Lynn Payer a battezzarlo così, identificando anche una decina di tattiche che lo caratterizzano. Per esempio, prendere una caratteristica normale, fisiologica e far pensare che ci sia qualcosa di sbagliato. Oppure usare termini vaghi come «carenza» o «squilibrio» che significano tutto e niente. O, ancora, piegare la statistica a piacimento per farle dire quello che i fatti, in realtà, non dicono. Tutto questo corredato da un'adeguata campagna pubblicitaria che lavori sulla vergogna o sulla paura e il gioco è fatto. E, in effetti, a pensare alle pubblicità dei prodotti per la cellulite o anti-invecchiamento sembra che il tempo della povera Edna non sia poi così lontano.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Fantastiche lecitine

Le proprietà emulsionanti di questi additivi alimentari li rendono adatti a moltissime applicazioni

Sulle etichette di molti prodotti confezionati – dal cioccolato alle salse pronte al pane in cassetta – si trova un ingrediente spesso misterioso per molti consumatori: la lecitina. È una molecola scoperta dal chimico francese Maurice Gobley che nel 1846 isolò dal tuorlo d'uovo una sostanza di colore arancione. In seguito, Gobley scoprì la stessa sostanza nel sangue, nel cervello e in altri organi. In tutti i casi, la sostanza che lui battezzò lecitina, conteneva fosforo legato a una struttura simile a un grasso. Si scoprì poi che la sostanza isolata in realtà non era una molecola pura ma un gruppo di molecole chimicamente simili ma che potevano essere differenziate e isolate. Ora chiamiamo queste molecole fosfolipidi e si trovano in ogni essere vivente, animale o vegetale.

Senza controindicazioni

L'alimento più ricco di lecitine è il tuorlo d'uovo, che ne contiene il 17 per cento del suo peso secco – senza considerare l'acqua quindi – e sono fondamentali per renderlo così cremoso e stabile, dato che contiene il 50 per cento d'acqua e il 30-35 per cento di grassi. La particolare struttura chimica delle lecitine riesce a far coesistere acqua e grassi in una emulsione. Nel latte e nella panna per esempio sono proprio i fosfolipidi a tenere sospesi i globuli di grasso nell'acqua.

I vegetali non sono così ricchi di lecitine, i più ricchi sono i semi oleosi come quelli di soia e di girasole, che con circa il due per cento ne costituiscono la principale fonte industriale e sono il sottoprodotto del processo di raffinazione dei rispettivi oli vegetali.

Le lecitine sono un additivo alimentare indicato dalla legislazione dell'Unione Europea con il codice E322. Non hanno controindicazioni specifiche e sono usate in una varietà di prodotti grazie alle loro proprietà emulsionanti. Una delle applicazioni più tradizionali delle lecitine è nella produzione di tavolette di cioccolato. Le proprietà del cioccolato sono molto complesse, a causa della presenza contemporanea di una gran quantità di grassi – il «burro di cacao» costituisce circa il 50 per cento del cacao – di zuccheri, particelle di cacao, proteine e, nel cioccolato al latte, solidi del latte. Durante la produzione del cioccolato lo zucchero aggiunto viene ridotto in particelle piccolissime. Più i cristalli di zucchero diventano piccoli più aumenta la viscosità del cioccolato, anche se durante la fase produttiva è tenuto a temperature tali da essere liquido. Per mantenere la fluidità del cioccolato una possibilità è aggiungere altro burro di cacao.

Tuttavia, questo ha lo svantaggio di essere una materia prima costosa e, in più, l'aggiunta di burro di cacao, insapore, diluisce il sapore proveniente dal cacao. Un'alternativa molto efficace e usata da molti produttori è aggiungere lo 0,2-0,4 per cento di lecitina. Poiché lo zucchero è affine all'acqua, i fosfolipidi circondano il cristallo, esponendo verso il burro di cacao le code grasse della molecola, aumentando in questo modo la lubrificazione dei cristalli e riducendo la viscosità.

Stabilizzare le salse

Una seconda area di applicazione è l'industria dei prodotti da forno. L'aggiunta di lecitina agli impasti lievitati migliora l'estendibilità del glutine migliorando la lievitazione e producendo un prodotto con una consistenza più uniforme e un volume maggiore. In più le lecitine ritardano la retrogradazione degli amidi che portano a un indurimento dei prodotti, il classico pane raffermo.

Un terzo campo di applicazioni sfrutta le capacità emulsionanti per mantenere stabile un liquido – che sia una salsa, una zuppa o un altro prodotto – che contiene sia una base acquosa sia dei grassi in sospensione. Potete provare anche voi a casa a usarla per stabilizzare un'emulsione instabile come una vinaigrette o una salsa grassa.

Le tavolette di cioccolato sono uno dei prodotti in cui vengono usate più spesso le lecitine poiché aumentano la lubrificazione dei cristalli di zucchero.

idart/iStockphoto

Vestiti di nero, e con le mascherine d'ordinanza per ladri da fumetto, i Rudi devono scassinare una cassaforte dalla combinazione particolare

Tra Feynman e Fantomas

Quattro scure figure – tre grossomodo umane, una di taglia decisamente inferiore ma certamente più elegante e a suo agio delle altre – si aggirano con passo felpato negli oscuri corridoi del palazzo. Le tre più grandi indossano calzamaglie nere, pantaloni neri, dolcevita nere, scarpe da ginnastica nere e mascherine nere. La più piccola, l'unica credibile, è vestita solo della sua *mise* naturale.

«Questo *black-out* è stato davvero provvidenziale...», sibila una timida voce maschile.

«La provvidenza non c'entra. È bastato ridurre al silenzio un ben preciso fusibile», replica una seconda voce, più baritonale.

«Già. Però adesso non vediamo un accidente neanche noi», ringhia una terza, con toni da contralto.

«Tzè. Non crederete mica che nel mio completo da *r'afinato voleur internascionale* manchi una torcia...»

«Allora vedi di accenderla, prima che finiamo contro uno spigolo... e piantala di parlare come l'ispettore Clouseau; neppure lui sarebbe finito in una situazione come questa, ti rendi conto?»

«Ehi, ma avevate detto che era tutto una specie di scherzo, no? Non sarà che adesso viene fuori che rischiamo davvero la galera? Perché in tal caso io e Gaetanagnesi ci togliamo subito la mascherina nera da Banda Bassotti e ce ne torniamo a guardare in santa pace la TV.»

«Non fare lo spiritoso, Doc; la micia viene solo dove vado io, e grazie al cielo lei non abbisogna di mascherine o altre scemenze...», sibila Alice.

«E per quanto riguarda la galera – ridacchia Rudy – giudica tu: in fondo siamo in un appartamento che non è il nostro, in assenza del proprietario, e in elegante tenuta ladresca. Un pubblico ministero gongolerebbe come un bimbetto al luna-park, dovesse esercitare le sue funzioni in un ipotetico processo contro di noi...»

«Ehi!», fa la voce di Piotr, un'ottava sopra il tono normale: «Non avevate parlato di processi e pubblici ministeri, prima! Siete impazziti? Io...»

«Piantala, Doc. E piantala pure tu, Rudy... lo sai che Piotr si spaventa facile, in queste situazioni.»

«Non è questione di spaventarsi! È solo che avevate detto che dovevamo fare un favore a qualcuno, non commettere un reato!»

«Shht! Parla piano! E comunque sì, è come ti abbiamo detto.»

«... e allora che ci facciamo qui, vestiti come brutte copie di Fantomas? Se arriva il proprietario, che gli diciamo, che siamo un'organizzazione benefica e che gli svaligiamo casa per fare un favore al fondo pensione grassatori?»

La micia, che guidava la fila degli aspiranti topi d'appartamento, sospira e si ferma con lo sguardo disgustato che i professionisti riservano ai dilettanti cialtroni. I tre umani fanno capannello nel bel mezzo dell'oscuro e sconosciuto soggiorno.

Illustrazione di Stefano Fabbri

«Per l'ennesima volta, Doc: va tutto bene, vuoi calmarti?», sospira Alice, sfilandosi il domino dagli occhi.

«Ecco, sì, calmati... – ribadisce Rudy – e comunque: il proprietario di questa casa non rientrerà. E se anche rientrasse, non sarebbe grave: è a lui che dobbiamo fare il favore, ricordi? È il nostro amministratore di condominio, ed è stato proprio lui a chiederci di scassinargli la cassaforte di casa, ma insomma quante volte devo ripetertelo?»

«Tutte le volte necessarie a convincermi. E poi, tu avevi parlato di Nobel e di tamburi...»

«...e anche di casseforti, ricordi? Le cose per cui è diventato famoso Richard Feynman: suonare i bongo, che sappiamo fare; scassinare casseforti, che ci accingiamo a fare, e...»

«... e una gitarella a Stoccolma per avere sistemato l'elettro-

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve ad aprile e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI FEBBRAIO

Estraendolo dalla sceneggiatura, il problema del mese scorso consisteva nella costruzione di 5 gruppi a partire da 2013 elementi iniziali, facendo in modo di minimizzare il numero di elementi di un sesto gruppo, costruito successivamente da elementi dei 5 originari, e soprattutto facendo sì che un numero qualsiasi compreso tra 1 e 2013 fosse sempre ottenibile come somma esatta di uno o più dei sei gruppi. Sia Q il numero di elementi del gruppo più piccolo: estraendo da questo sino a P elementi, si possono ottenere tutti i numeri nell'intervallo [0,P]. Per ottenere $P + 1$ occorre che $Q - P \leq P + 1$; da cui $Q \leq 2P + 1$. Possiamo allora ottenere tutti i numeri sino a $P + Q$ estraendo un massimo di P elementi dagli altri gruppi, che sono sicuramente più grandi del primo; per ottenere il valore $P + Q + 1$, il secondo gruppo dovrà contenere R elementi con $R - P \leq Q + P + 1$. Iterando il ragionamento, si deduce che i cinque gruppi dovranno contenere al più $2P + 1$, $4P + 2$, $8P + 4$, $16P + 8$ e $32P + 16$ elementi, ossia un totale di $62P + 31$ elementi. Con gruppi di questo tipo si può costruire qualsiasi numero in funzione del valore di P: si verifica facilmente che il totale degli elementi necessari supera 2013 con $P = 32$, valore con il quale si possono ottenere tutti i numeri sino a 2015. Essendo P il numero di elementi del gruppo costruito (e più piccolo) la micia ad ogni turno otterrà al più 32 crocchette.

dinamica quantistica. Questo lo abbiamo in agenda per giovedì prossimo, vero Capo?», ridacchia Alice.

«Spiritosa. Comunque, due su tre mi pare già una bella *performance*! Per questo sono stato davvero felice quando l'amministratore ha chiesto a me Alice di aiutarlo ad aprire la sua cassaforte mentre tu, Doc, eri fuori a far spese.»

«Ma non potevamo venire qui come fa la gente normale, allora? Accolti dal padrone di casa con convenevoli, sorrisi, e noi vestiti normalmente e magari perfino invitati a cena?»

«Ma non hai il minimo senso della misura, tu! Vorresti scassinare una cassaforte in *smoking* e con un aperitivo in mano? Sono io che ho chiesto, anzi ho preteso, di potere esercitare le nostre funzioni di raffinati ladri internazionali come si deve, con tenuta d'ordinanza, acconcia ambientazione, e...»

«Va bene, adesso piantatela, tutti e due», taglia corto Alice; «che adesso viene il bello, anzi il brutto. Sei davvero in grado di scassinare casseforti, Capo? Non per mancanza di fiducia, ma...»

«Non prevedo grosse difficoltà. In fondo, conosco la combinazione. L'amministratore me l'ha detta.»

«Ma per la miseria – sbotta Piotr – non c'è proprio limite alle buffonate? Un tizio ha una cassaforte, conosce la combinazione, e incarica un altro deficiente di scassinargliela? Se non fosse che il deficiente in questione ha coinvolto altri peggio di lui, e tra questi ci sono anch'io, morirei dalle risate.»

«Il fatto è che si tratta di una cassaforte speciale – spiega Rudy – niente dischi combinatori o pulsantiere, solo maniglie. Trentasei, per la precisione.»

Silenzio e perplessità.

«Suvvia, non è niente di straordinario, in fondo: 36 maniglie, disposte a quadrato 6 per 6, con due sole posizioni possibili: orizzontale o verticale. La "combinazione" di apertura, diciamo così, prevede tutte le maniglie in posizione verticale. Fatto questo, la cassaforte si apre con un delizioso "clic".»

«Treccia, anche tu sapevi di questa buffonata e non mi hai detto niente? Uno "scassinamento" attuabile anche da un quattrenne non particolarmente brillante?»

«Sì, Doc, rilassati, una buona volta... – sospira Alice – c'è la complicazione che quando si ruota una maniglia, facendole cambiare stato, tutte le maniglie della riga e della colonna fanno lo stesso: cambiano stato anche loro. L'amministratore, per chiudere la cassaforte, si limitava ripetere una serie di rotazioni che aveva memorizzato e che sapeva ripetere al contrario all'occorrenza. Ma a quanto pare, ieri il suo piccolo nipote si è divertito a muovere un po' di maniglie a caso, e quindi il nostro non sa più aprire la cassaforte.»

«Oh, per la miseria. E quindi dovremo davvero tirar fuori stetoscopi, grimaldelli, acidi, esplosivi? Mi ricordo benissimo che Feynman non si è mai dovuto abbassare a certi mezzucci: lui usava solo logica e un po' di psicologia, nessun attrezzo pericoloso.»

«Giusto, Doc – sogghigna Rudy – perché non provi a fare lo stesso anche tu, invece di frignare? Puoi anche fare a meno della psicologia, la logica dovrebbe esserti sufficiente. Al più condiscila con la tua amata simmetria, no?»

Per una teoria realistica della realtà

Le carenze della meccanica quantistica indicano che è tempo di cambiare

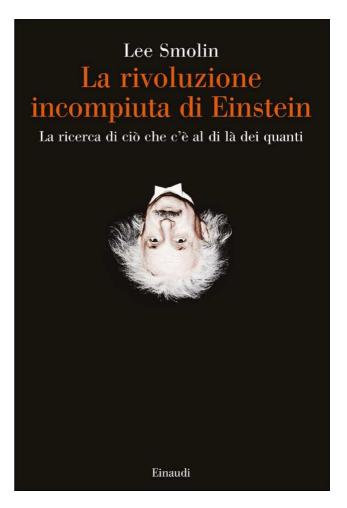
La rivoluzione incompiuta di Einstein
di Lee Smolin
Einaudi, Torino, 2020, pp. 266 (euro 28,00)

Lee Smolin è un fisico teorico dai vasti interessi. Il suo principale argomento di ricerca è l'unificazione di relatività generale e meccanica quantistica: insieme a Carlo Rovelli ha sviluppato la «gravità quantistica a loop», un tentativo dei più promettenti in questa direzione. Ma si è occupato anche di fisica delle particelle, cosmologia, biologia teorica, filosofia della scienza e persino dei fondamenti dell'economia. Il suo ultimo saggio è un esame senza sconti dei fondamenti della meccanica quantistica.

Per Smolin la meccanica quantistica come la conosciamo oggi è «un'idea che sta chiaramente per crollare a causa delle sue carenze». Non è in dubbio la sua capacità di fornire previsioni esatte sui risultati degli esperimenti. Ma la teoria presenta alcuni lati oscuri che, visti i successi sperimentali, i fisici hanno messo da parte. Chi, come Smolin, cerca nella fisica una teoria realistica della realtà, non può accontentarsi di predizioni corrette.

Com'è noto, la teoria quantistica descrive la natura in termini statistici: studiando il moto di un elettrone, al massimo possiamo calcolare la probabilità di trovarlo in un certo punto. Invece di immaginarlo come una particella localizzata, dovremmo dunque rappresentarlo come una nuvola di probabilità – i fisici la chiamano «funzione d'onda» – diffusa in una regione dello spazio. Sappiamo come questa nuvola cambia nel tempo grazie all'equazione di Schroedinger, che non ha nulla di probabilistico. Ma quando un rivelatore osserva il passaggio dell'elettrone, all'improvviso la nuvola «collassa» e si concentra nel punto indicato dal rivelatore.

Da qui nasce un primo problema teorico. Se consideriamo un rivelatore solo come un insieme di atomi interagenti con l'elettrone, il comportamento di quest'ultimo è descritto dall'equazione di Schroedinger. Se la stessa interazione è una «misura» (e la decisione sta all'osservatore), la funzione d'onda «collassa» in modo casuale. In secondo luogo, la meccanica quantistica si applica a oggetti microscopici come atomi e molecole, mentre i corpi macroscopici seguono la fisica classica di Isaac Newton: ma chi stabilisce il confine tra microscopico e macroscopico? Il tedesco Werner Heisenberg, uno dei padri della meccanica quantistica, scrisse che essa è solo «un'immagine del nostro rapporto con la natura». Al contrario per Smolin, in accordo con Albert Einstein, una teoria realistica del mondo deve essere indipendente dall'osservatore.

Smolin passa in rassegna le teorie che fin dagli anni venti hanno cercato di conciliare il potere predittivo della meccanica quantistica con un approccio realistico. I dubbi di Einstein, la teoria dell'«onda pilota» di Louis De Broglie, poi sviluppata da David Bohm negli anni cinquanta, l'interpretazione «a molti mondi» elaborata da Hugh Everett. Ognuna di queste teorie risolve alcuni problemi della meccanica quantistica ma ne crea altri: primo fra tutti, l'incompatibilità con la relatività di Einstein. Dunque, conclude, sono maturi i tempi per una nuova rivoluzione scientifica, di cui delinea alcuni requisiti. Per esempio, la nuova teoria realista «non dovrebbe dipendere da strutture fisse che non si evolvono dinamicamente», come erano lo spazio e il tempo nella fisica classica. Spazio e tempo devono diventare concetti relazionali, il risultato dell'interazione tra i componenti fondamentali della realtà.

Smolin ammette che a frenare questo salto non è solo la difficoltà intellettuale, ma anche l'organizzazione stessa della comunità scientifica, in cui è poco conveniente occuparsi di problemi teorici fondamentali. «Il mondo accademico è molto adatto a sostenere quella che Thomas Kuhn chiama scienza normale», scrive Smolin. «È un'ottima cosa finché non è arrivato da tempo il momento di completare una rivoluzione».

Andrea Capocci

Se il medico impara dagli sbagli

L'analisi degli errori in medicina può indicare come risolverli

È il 1970 circa, siamo nel Minnesota rurale. Una coppia di giovani ha già un figlio, ma qualcosa non funziona nella seconda gravidanza. I segnali indicano che Barb è incinta, ma il test delle urine è sempre negativo. Su consiglio del medico David Hilfinker, Barb si sottopone a un raschiamento. Ma durante l'operazione il medico si accorge troppo tardi che sta rimuovendo un feto vivo: i test dicevano una cosa, la realtà era un'altra. Devastato, Hilfinker fa qualcosa di inusuale: parla del suo errore. Anzi, ne scrive sul «New England Journal of Medicine», convinto che analizzare gli errori commessi possa essere la chiave per evitarli in futuro.

A questo articolo, Daniele Coen, già direttore del Pronto soccorso dell'Ospedale Niguarda di Milano, attribuisce il merito di aver iniziato una discussione su un tema ancora tabù per la medicina: gli errori. Non ci scandalizziamo quando un professionista qualsiasi sbaglia, ma le cose cambiano di fronte all'errore medico e, dice Coen, ci aspettiamo un'infallibilità che non è possibile. I medici commettono errori per svariati motivi, da una cattiva comunicazione a un'organizzazione lacunosa, dal deficit di conoscenze a distrazioni banali. Quello che è più grave, però, è che fino all'articolo di Hilfinker non si è cercato di analizzare il perché degli sbagli. Ma proprio dall'analisi delle cose che non sono andate per il verso giusto possono emergere indicazioni importanti per una soluzione. Ne sono un esempio le *checklist* dell'Organizzazione mondiale della Salute oggi raccomandate in tutte le sale operatorie.

Tra tutte le mancanze di cui tratta, Coen ne individua una più grave delle altre: la mancanza di comunicazione. Che non significa solo mandare un messaggio, ma assicurarsi che chi lo riceve lo abbia compreso: vale per il paziente che non capisce il gergo medico, ma anche per il medico stanco che a fine turno affida i pazienti al collega, per le volte in cui non si chiede un chiarimento perché non c'è tempo o non si vuole passare per rompiscatole. Costruire protocolli che superino questi ostacoli porterà a una medicina migliore. Ma bisogna parlarne.

Marco Boscolo

Margini di errore
di Daniele Coen
Mondadori, Milano, 2020,
pp. 170 (euro 17,00)

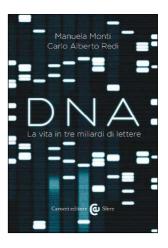
La doppia elica della vita

Gli studi sul DNA continuano ad aprire nuove prospettive

Per guardarla più da vicino basta staccare la doppia pagina finale e seguire le istruzioni per realizzare l'*origami*. Sebbene si tratti soltanto di un modellino, la sagoma della doppia elica del DNA si snoda davanti ai nostri occhi nella sua apparente semplicità e bellezza.

Come sottolineano gli autori, si tratta di un'immagine ormai familiare, «una delle più importanti icone dei nostri giorni». In questo saggio, gli scienziati Manuela Monti e Carlo Alberto Redi si propongono di dimostrare come questa fama sia del tutto meritata e, anzi, come gli studi sul DNA non abbiano esaurito il proprio rivoluzionario potenziale. Per farlo è utile seguire una linea del tempo che parte da un passato non certo remoto e si proietta in avanti a descrivere scenari che possiamo solo immaginare. La molecola che racchiude il segreto della vita si presentò per la prima volta sotto forma di una sostanza biancastra proveniente dal pus presente sulle bende che medicavano una ferita infetta, alla fine del XIX secolo, ma fu solo intorno agli anni venti del secolo scorso che si iniziò a comprendere il suo ruolo nella trasmissione dei caratteri ereditari e, nel tempo, anche i dettagli della sua struttura.

A questi passaggi fondamentali è dedicata la prima parte dell'esposizione, necessaria per inquadrare il discorso, che poi si sposta a seguire i tanti filoni aperti dagli studi passati e in corso. Attraversando tappe fondamentali come le tecniche di sequenziamento e la PCR (che consente di amplificare le tracce di DNA per poterle analizzare), il discorso si sposta anche su importanti temi con conseguenze sociali ed etiche. Per esempio, la riflessione sull'inesistenza delle razze umane, un fatto che la scienza ha ormai da tempo acclarato, sebbene questo non abbia impedito al razzismo di continuare a far sentire la sua nefasta presenza. E poi temi come l'editing genetico di precisione, il DNA antico, gli organismi geneticamente modificati, il DNA artificiale, alternando a parti più tecniche altre che suggeriscono spunti di riflessione o, ancora, aneddoti che fanno chiarezza mentre stuzzicano la curiosità.

Anna Rita Longo

DNA
di Manuela Monti
e Carlo Alberto Redi
Carocci Editore, Roma, 2019,
pp. 176 (euro 15,00)

Capire i disastri e come evitarli

Un'analisi attenta e chiara dei fenomeni climatici in gioco

L'equazione che dà il titolo al libro non deve far pensare a un ricco di tecnicismi. Non solo perché è l'unica citata, ma anche perché Antonello Pasini, fisico del clima del Consiglio nazionale delle ricerche, non la usa per fare calcoli, ma per mettere in ordine i termini del problema: è vero che i disastri meteoclimatici sono in aumento e cresceranno ancora? E come possiamo rimediare?
Sviscerando i tre semplici termini dell'equazione, Pasini analizza i fattori in gioco nell'aumento dei disastri, con un occhio alla scala globale e un altro all'Italia e al Mediterraneo. Innanzitutto c'è il pericolo dato dal clima che cambia, aumentando frequenza e intensità degli eventi dannosi. Ma c'è anche il contesto su cui il clima agisce, espresso negli altri due fattori: vulnerabilità di un territorio maltrattato, meno capace per esempio di sopportare senza disastri precipitazioni intense; ed esposizione crescente, per l'aumento di popolazione e costruzioni ma anche per le pessime scelte su dove e come costruire.
Detto in poche righe, sembrano cose risapute. Quel che fa la differenza è l'analisi attenta e precisa, seppure sintetica e chiara, con cui Pasini analizza uno a uno i fenomeni in gioco, dagli spostamenti delle celle di circolazione atmosferica alle particolarità dell'area Mediterranea, e le loro conseguenze sui vari tipi di eventi.
Chiarisce così quel che sappiamo su come il cambiamenti del clima, del territorio e dei nostri modi di vivere si traduce in maggiori rischi, che cosa sospettiamo, e che cosa ancora non possiamo dire. E sviscera quel che possiamo fare per ridurre i rischi, partendo dal contenere le emissioni di gas serra per ridurre il pericolo, ma curando anche la gestione del territorio, la preparazione delle popolazioni e tutti gli altri interventi che diminuiscono la vulnerabilità e l'esposizione.
La conclusione Pasini vuol vederla in positivo: non c'è dubbio che «il rischio tenda ad aumentare, soprattutto a causa delle azioni umane. Questo però apre uno spiraglio di azione. Infatti, se i cambiamenti fossero naturali non potremmo intervenire». Quindi, in realtà, è una buona notizia. «Sapremo sfruttarla?»

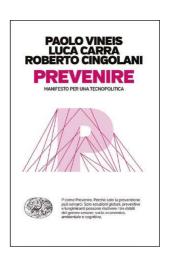
Giovanni Sabato

L'equazione dei disastri
di Antonello Pasini
Codice Edizioni, Torino, 2020,
pp. 184 (euro 16,00)

Soluzioni per il domani

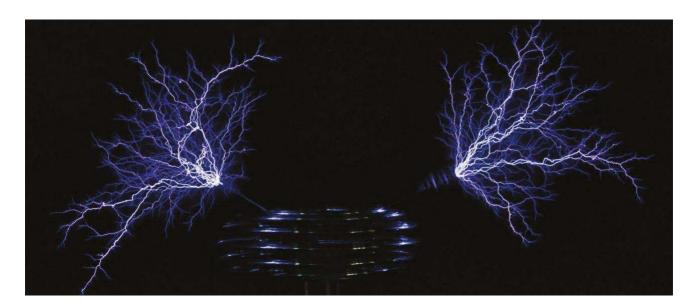
Le scelte ragionate possibili per affrontare le crisi di oggi

Sono tre i debiti principali nel mondo di oggi: il debito socioeconomico, il debito ambientale, il debito mentale. Li abbiamo generati in qualche migliaio di anni e accelerati nell'ultimo secolo, grazie allo sforzo per migliorare la condizione della nostra specie.
Come viene ben descritto in questo agile volume, abbiamo migliorato l'aspettativa di vita globale, riusciamo a dare da mangiare a un numero crescente di individui e sempre più persone hanno accesso a formazione e informazione. Ma lo abbiamo fatto a spese del mondo come lo conoscevamo, modificandolo profondamente e mettendo a rischio l'equilibrio che ha retto finora le società umane.
C'è una crisi sociale, legata a meccanismi economici di ridotta tassazione e ridotta mobilità tra classi, che di fatto mina molti dei progressi di sanità pubblica: l'aumento delle disuguaglianze e politiche di riduzione fiscale mettono alla prova i sistemi di *welfare* universale. I quali a loro volta si trovano a dover affrontare l'aumento di malattie dovute proprio allo stesso sistema sociale di insicurezza lavorativa e a stili di vita malsani dovuti al ceto sociale (alimentazione peggiore, ambienti più inquinati e così via). C'è poi la crisi ambientale, sotto gli occhi di tutti: aumento delle temperature, perdita di biodiversità, degradazione dei suoli, carenze idriche, e tutto quello che ne consegue in termini di prevedibilità dei cicli stagionali e di capacità dell'ambiente di sostenere l'esistenza umana. Da ultimo, l'evoluzione delle tecnologie digitali ha reso disponibili molte più informazioni, ma ci ha anche reso più difficile estrarre un significato da esse e prendere decisioni in base a esse. Inoltre, ha aumentato il controllo sui singoli individui.
Come affrontare queste crisi? Grazie alla scienza e alla tecnologia, ma soprattutto a quella che gli autori definiscono una «tecnopolitica della prevenzione» che non sia affidata solo al mercato, in grado di fare scelte ragionate di lungo periodo e di tenere insieme i diversi aspetti, interdipendenti tra loro, del singolo, dell'umanità nel suo complesso, e dell'ambiente di cui siamo parte.

Mauro Capocci

Prevenire
di Paolo Vineis, Luca Carra, Roberto Cingolani
Einaudi, Torino, 2020,
pp. 136 (euro 15,00)

fino al 29 marzo 2020
Spazio Ventura XV, via Privata Giovanni Ventura 15, Milano
http://www.mostratesla.it/

Esperienze elettrizzanti

Una mostra interattiva e multimediale sulla vita e le invenzioni di Nikola Tesla

Uno spazio espositivo di 1500 metri quadrati ospita a Milano la prima e unica tappa in Italia della mostra dedicata a Nikola Tesla, nato nel 1856 e scomparso nel 1943. Nel 2003 l'UNESCO ha riconosciuto come patrimonio universale ed eredità destinata all'umanità intera le invenzioni e la documentazione prodotte da Tesla. Quella milanese è l'occasione per poterne vedere gli originali: il museo ufficiale Tesla di Belgrado ha infatti reso disponibili molte teche con lettere, oggetti personali, disegni, brevetti e dispositivi ancora funzionanti.

Da Belgrado, e precisamente dal museo ufficiale dedicato a Nikola Tesla, arrivano molti degli oggetti che la mostra milanese presenta per la prima volta in Italia. Sopra e a fianco, alcune immagini delle sale dell'esposizione.

I visitatori sono divisi in gruppi e una guida li accompagna per la prima parte del percorso, che ricostruisce le tappe della vita del geniale inventore. I dati biografici testimoniano la formazione intellettuale completa del giovane Tesla, di educazione sia scientifica sia umanistica, insieme alla sua propensione per la risoluzione teorica e pratica di ogni tipo di problemi, accompagnata all'amore per la lettura dei classici. La visita fa rivivere i momenti di successo della gioventù insieme a quelli meno felici della maturità, mettendo in funzione gli oggetti realizzati dallo stesso Tesla, come il modello ad acqua del suo famoso motore elettrico a induzione o la macchina dell'uovo di Colombo esposta alla Fiera internazionale Colombiana di Chicago del 1893. Con la guida è possibile entrare anche nella riproduzione reale e fedele del laboratorio di Colorado Springs e vedere dal vivo i suoi fulmini artificiali.

Oltre all'aspetto biografico è stato curato con molta attenzione quello scientifico in modo da non trascurare il valore delle scoperte di Tesla, dal motore elettrico alle ricerche sulle correnti ad alta frequenza, ai raggi X, all'automazione con il controllo a distanza per mezzo di onde radio, per fare alcuni esempi fra i suoi circa 300 brevetti. Le due famose controversie che lo videro impegnato, prima con Thomas Alva Edison e poi con Guglielmo Marconi occupano due spazi ricchi di informazioni e testimonianze storiche. La seconda parte della mostra è uno spazio interattivo per «toccare con mano» le idee scientifiche esposte nella prima parte del percorso, comprese vere e proprie piccole scosse!

Rimangono infine nella memoria i pannelli con le frasi di Tesla che testimoniano il suo amore per l'umanità.

Francesca E. Magni

Cortesia Venice Exhibition Srl (*tutte le foto, 2*)

Prossimo numero

in aprile

Dossier: intelligenza artificiale e salute digitale

di D. H. Freedman, S. Reardon, C. Willyard, A. Kaushal e R. B. Altman

Dalla scoperta di nuovi farmaci all'interpretazione delle immagini mediche, l'impiego dell'intelligenza artificiale sta per rivoluzionare la pratica clinica, ma per avere applicazioni efficaci è indispensabile che macchine ed esseri umani lavorino insieme.

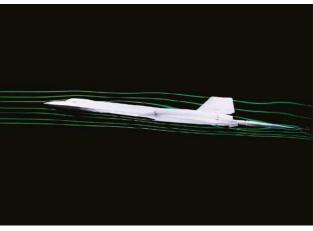
Fantasmi del passato

di Anna Meldolesi

Recenti scoperte documentano l'impronta lasciata nel DNA umano moderno da specie di ominini ancora sconosciute ma sicuramente arcaiche, confermando che il nostro attuale genoma è frutto di interazioni complesse e di lunga durata tra esseri umani anatomicamente moderni e varie popolazioni di ominini arcaici.

L'enigma della portanza

di Ed Regis

Gli ingegneri sanno come progettare aerei che rimangono in volo, ma non è ancora chiaro perché si verifica la portanza aerodinamica. Le due teorie esistenti la spiegano entrambe in modo incompleto, e i tentativi per colmare le lacune sono tuttora infruttuosi.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
Il responsabile del trattamento dei dati raccolti in banche dati di uso redazionale è il direttore responsabile a cui è possibile rivolgersi scrivendo a privacy@lescienze.it per i diritti previsti dal Regolamento (UE) 2016/679 sulla protezione dei dati personali.

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - febbraio 2020

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting Editor in Chief
Curtis Brainard
President
Dean Sanderson
Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *La forza sorprendente della mente aviaria;* Silvio Ferraresi: *Neuroni in forma;* Eva Filoramo: *Senza GPS;* Lorenzo Lilli: *L'arcipelago galattico;* Alfredo Tutino: *Centro di gravità, La rivoluzione dei farmaci a DNA, Il potere delle sfere, I geni del bambino, Tutti noi.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018

Who_I_am/iStockphoto (*medicina digitale*); Ian Allen (*portanza*)

il più grande viaggio dell'arte mai raccontato

ULISSE
L'ARTE E IL MITO

Forlì, Musei San Domenico 15 febbraio - 21 giugno 2020

Informazioni e prenotazioni 199 15 11 34

Riservato gruppi e scuole 0543 36 217 mostraforli@civita.it – www.mostraulisse.it

main partner

platinum partner

media partner

catalogo